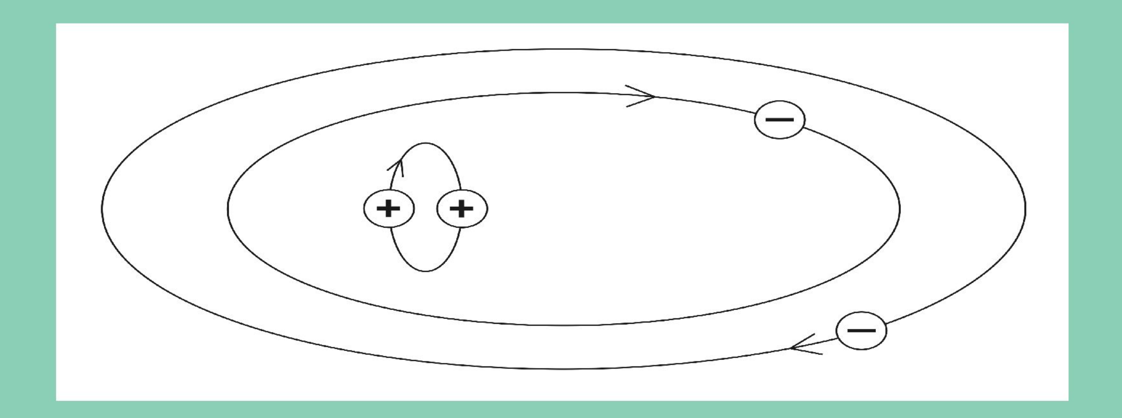
Webers Planeten-Modell des Atoms



A.K.T. Assis
K.H. Wiederkehr
G. Wolfschmidt

Webers Planeten-Modell des Atoms

Andre K.T. Assis
K.H. Wiederkehr
G. Wolfschmidt



Published by C. Roy Keys Inc.
4405, rue St-Dominique
Montreal, Quebec H2W 2B2 Canada
http://redshift.vif.com

First Published 2018

National Library of Canada Cataloguing in Publication

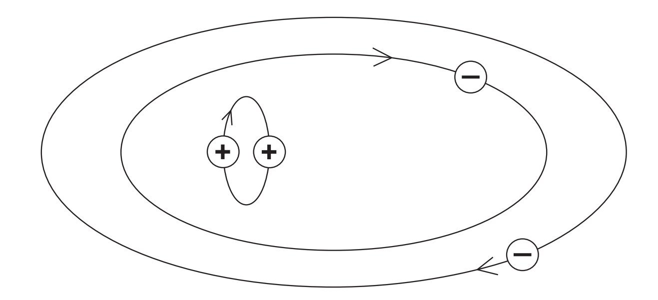
Assis, André Koch Torres, 1962-
[Weber's planetary model of the atom. German]
Webers Planeten-Modell des Atoms / Andre K.T. Assis, K.H. Wiederkehr, G. Wolfschmidt.

Translation of: Weber's planetary model of the atom.
Includes bibliographical references.
Issued in print and electronic formats.
ISBN 978-1-987980-13-4 (softcover).--ISBN 978-1-987980-14-1 (PDF)

1. Electrodynamics. 2. Atoms--Models. 3. Weber, Wilhelm Eduard, 1804-1891. I. Wolfschmidt, Gudrun, author II. Wiederkehr, K. H. (Karl Heinrich), author III. Title. IV. Title: Weber's planetary model of the atom. German

QC631.3.A8715 2018 537.6 C2018-901643-4
C2018-901644-2

Webers Planeten-Modell des Atoms



A. K. T. Assis[1], K. H. Wiederkehr und G. Wolfschmidt[2]

1 - Institute of Physics 'Gleb Wataghin'
University of Campinas—UNICAMP
13083-859 Campinas, SP, Brazil
E-mail: assis@ifi.unicamp.br
Homepage: http://www.ifi.unicamp.br/~assis

2 - Zentrum für Geschichte der Naturwissenschaft und Technik
Fachbereich Physik, Universität Hamburg
Bundesstrasse 55 - Geomatikum
D-20146 Hamburg, Deutschland
Homepage: http://www.hs.uni-hamburg.de/DE/GNT/w.htm

Aus dem Englischen von Hermann Härtel
E-mail: haertel@astrophysik.unikiel.de
Homepage: http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel

Inhaltsverzeichnis

Diese deutsche Übersetzung ist unserem großen Freund und Wissenschaftshistoriker Karl-Heinrich Wiederkehr (1922-2012) gewidmet als einer der Autoren des erstmal in englischer Sprache erschienenen Buches *Weber's Planetary Model of the Atom*.[1]

[1] [AWW11] und [AWW14].

Vorwort

Der vorliegende Text ist eine Übersetzung von Kapitel 1, Seiten 17-101, des Buches *Weber's Planetary Model of the Atom*.[2]

In diesem Buch wird das von Wilhelm Weber (1804-1891) in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts entwickelte Atommodell vorgestellt. Diese Entwicklung geschah vor der Bekanntmachung des Bohrschen Modells. Dieses Modell basiert auf der Weberschen elektrodynamischen Kraft von 1846. Diese Webersche Kraft ist abhängig von der Entfernung der wechselwirkenden Ladungsträger, derer relativen radialen Geschwindigkeit und derer relativen radialen Beschleunigung. Weber zeigte, daß sich zwei interagierende Ladungsträger der gleichen Polarität genau so verhalten können, als hätten sie negative träge Masssen und zwar unter folgender Bedingung: Die wechselwirkenden Teilchen sind relativ zu einander beschleunigt und bewegen sich in einem gegenseitigen Abstand unterhalb eines kritischen Wertes ρ. Falls diese Bedingung erfüllt ist, werden sich diese Ladungsträger gleichen Vorzeichens gegenseitig anziehen anstelle der normalerweise beobachteten Abstoßung. Weber stellte dann die Hypothese auf, daß Atome aus negativen Ladungsträgern zusammengesetzt sein könnten, die elliptische Bahnen um einen positiv geladenen Kern ausführen; sie werden von diesem Kern angezogen, und die positiven Teilchen, die den positiven Kern bilden, ziehen sich ebenfalls an wegen ihrer negativen trägen Masse.

Drei bemerkenswerte Aspekte dieses Weberschen Modells sollen hervorgehoben werden:

1. Webers Vorhersage erfolgte vor der Entdeckung des Elektrons (1897) und auch vor Rutherfords Streuexperimenten (1911). Die Entwicklung dieses Modells erfolgte ebenfalls vor der Entdeckung der Balmer-Serien (1885) sowie der Paschen-Serien (1908), die die spektralen Emissionslinien des Wasserstoffatoms darstellen.

   Das Bohrsche Atommodell wurde dagegen entwickelt (1913), um mit diesen experimentellen Ergebnissen kompatibel zu sein. Während somit Bohrs Atommodel auf dieses Ziel hin entwickelt wurde, handelt es sich bei dem Weberschen Modell um eine echte Vorhersage.

2. Das Webersche Atommodell kommt ohne Kernkräfte zur Stabilisierung des positiven Kerns aus. Die positiven Teilchen des Kerns werden durch

[2] [AWW11] und [AWW14].

rein elektrodynamische Kräfte zusammengehalten. Bei der Entwicklung der modernen Physik mussten dagegen die Wissenschaftler die Existenz von Nuklearkräften postulieren, da die Kenntnisse bezüglich der Weberschen Elektrodynamik in Vergessenheit geraten waren. Nach dem die Existenz des positiven Kerns gesichert war, musste schließlich erklärt werden, wie die abstoßenden Coulomb-Kräfte zwischen seinen Bestandteilen neutralisiert werden. Hierzu wurde die Existenz von Kernkräften postuliert. Das planetare Atommodell von Weber hingegen bietet eine Vereinheitlichung des Elektromagnetismus mit nuklearen Kräften, und dies bevor diese beiden Zweige der Physik voneinander getrennt wurden. Sogar die Stabilität der Kerne wurde vorhergesagt und erklärt durch Webers Elektrodynamik

3. Als Weber sein Modell in den Jahren zwischen 1850 und 1870 entwickelte, waren Elektron und Positron noch nicht bekannt. Diese beiden Teilchen wurden erst 1897 und 1932 entdeckt. Daher konnte er nur qualitative und algebraische Berechnungen in Bezug auf seine kritische Entfernung ρ durchführen. Nimmt man aber die bekannten Werte bezüglich der Masse und der Ladung zweier Positronen und berechnet die Webersche kritische Entfernung, unterhalb derer sich diese Teichen beginnen, anzuziehen, so erhält man einen Wert in der Größenordnung von 10^{-15} m, der im Wesentlichen der bekannten Größe eines Atomkern entspricht. Die Übereinstimmung zwischen Webers ρ für diese Elementarteilchen und der Größe eines Atomkern muß kein Zufall sein. Vielmehr kann man davon ausgehen, daß die Webersche Elektrodynamik nicht nur eine korrekte Erklärung für die Stabilität des Atomkerns, sondern auch eine Begründung für dessen Größe liefert.

Andre Koch Torres Assis

Danksagungen

Einer der Autoren, AKTA, dankt dem Institut für Geschichte der Naturwissenschaften der Universität Hamburg sowie der Alexander von Humboldt-Stiftung, Deutschland, für ein Forschungsstipendium im Jahr 2009, während dessen nach einer Einladung durch Herrn Prof. G. Wolfschmidt diese Arbeit durchgeführt wurde. Sie stellt eine Fortsetzung der Arbeiten dar, die in den Jahren 2001 bis 2002 an der Universität Hamburg durchgeführt wurden auf Grund einer Einladung von Herrn Prof. K. Reich im Rahmen eines früheren Stipendiums der Humboldt Stiftung. Er dankt ebenfalls FAEPEX der Universität Campinas, UNICAMP, für finanzielle Unterstützung, sowie dem Physik-Institut der Universität Campinas, UNICAMP, für die Bereitstellung der erforderlichen Bedigungen, um diese Arbeiten durchzuführen.

Die Autoren danken folgenden Personen für Unterstützung, Anregungen, Korrekturen, Referenzen und anderes mehr: B. R. Bligh, C. Blondel, J. Gottschalk, L. Hecht, W. Lange, T. E. Phipps jr., K. Reich, T. Rüting, J. Tennenbaum und B. Wolfram.

Andre Koch Torres Assis[1], Karl-Heinrich Wiederkehr und Gudrun Wolfschmidt[2]

1 - Institute of Physics
University of Campinas—UNICAMP
13083-859 Campinas - SP, Brazil
E-mail: assis@ifi.unicamp.br
Homepage: http://www.ifi.unicamp.br/~assis

2 - Zentrum für Geschichte der Naturwissenschaft und Technik
Fachbereich Physik, Universität Hamburg
Bundesstrasse 55 - Geomatikum
D-20146 Hamburg, Deutschland
Homepage: http://www.hs.uni-hamburg.de/DE/GNT/w.htm

Kapitel 1

Einführung

Wilhelm E. Weber (1804-1891) war einer der bedeutendsten Wissenschaftler des 19. Jahrhunderts. Seine gesammelten Arbeiten wurden in der Zeit zwischen 1892 und 1894 in Form von sechs zusammenfassenden Abhandlungen veröffentlicht.[1] Weber verfasste in der Zeit zwischen 1846 und 1878 acht umfangreichere Abhandlungen mit dem gemeinsamen Obertitel *Elektrodynamische Maassbestimmungen*.[2] Die achte Abhandlung wurde posthum im Rahmen seiner gesammelten Werke veröffentlicht.

Im Folgenden wird die Entwicklung dargestellt, die zu Webers Planeten-Modell geführt hat.

[1] [Web92b, Web92a, Web93, Web94b, WW93, WW94].

[2] [Web46, Web52b, Web52a, KW57, Web64, Web71, Web78, Web94a].

Kapitel 2

Webers Atomismus

In der vorliegenden Arbeit werden einige spezielle Argumentationslinien nachgezeichnet, die Wilhelm Weber zu seinem Planeten-Modell des Atoms geführt haben. Dieses Modell steht im Zusammenhang mit der Natur des galvanischen Stromes, sowie mit den Ursachen des Widerstandes von Leitern, mit den Ampèreschen molekularen Strömen, mit dem Weberschen Fundamentalgesetz bezüglich der Interaktion zwischen Ladungsträgern und mit der Natur magnetischer und diamagnetischer Phänomene. Bevor auf diese Einzelheiten eingegangen wird, erscheint es wichtig, Webers allgemeine Vorstellungen über die Natur physikalischer Phänomene hervorzuheben. Während seiner gesammten wissenschaftlichen Laufbahn vertrat er eine korpuskulare oder atomistische Auffassung von der Natur. Nach dieser Konzeption hat das Universum eine körnige Konstitution mit einem Vakuum zwischen diesen Körnern. Weber verwendete verschiedene Namen, um diese Korpuskeln zu charakterisieren, nämlich Atome, Moleküle, Teilchen usw. Die Interaktion zwischen diesen Korpuskeln können durch Stöße oder durch solche Kräfte hervorgerufen werden, die in Abhängigkeit des Abstandes zwischen diesen Teilchen wirken. Weber ging von der Existenz eines Äthers zwischen diesen Teilchen aus. Aber auch dieser Äther wurde von Weber in korpuskularen Begriffen gedacht, nämlich bestehend aus geladenen Teilchen, die sich im Raum bewegen.

Eines der ersten Werke Webers war ein gemeinsames Buch mit seinem älteren Bruder Ernst Heinrich Weber (1795-1878), erschienen im Jahr 1825, *Wellenlehre auf Experimente gegründet oder über die Wellen tropfbarer Flüssigkeiten mit Anwendung auf die Schall- und Lichtwellen.*[1] In dieser Arbeit beschäftigten sich die Autoren mit Wellen in Flüssigkeiten und stellten auch Anwendungen für Schallwellen und Lichtwellen vor. Von all diesen Wellen wurde angenommen, dass sie sich in einem molekularen Medium ausbreiten.

Weber nutzte die Atomhypothese in allen Bereichen der Physik, in denen er arbeitete. Er interpretierte die Phänomene im Sinne einer Interaktion zwischen den kleinsten, am Prozess beteiligten Teilchen. Durch diese Wechselwir-

[1] [WW93].

kung änderten diese Partikel ihre Positionen und Bewegungen und erzeugten alle Arten von Vibrationen in einem Medium, das aus diesen Partikeln bestand. Weber war von der Existenz diskreter Elementarteilchen überzeugt. Am Ende seines Lebens versuchte er, zumindest qualitativ, diejenigen physikalischen Hauptphänomene abzuleiten, die sich auf die Existenz positiver und negativer geladenen Teilchen beziehen, die ihrerseits nach seinem Grundgesetz von 1846 miteinander in Wechselwirkung treten.

Webers Sichtweise wurde von vielen Physikern des 19. Jahrhunderts nicht geteilt. Anstelle dieser atomistischen Hypothese akzeptierten diese Wissenschaftler eine dynamische Weltanschauung, die auf der Existenz einer den gesamten Raum erfüllenden Kontinuumssubstanz basierte. Statt eines Gesetzes bezüglich der Wechselwirkung zwischen Atomen oder Molekülen suchten diese Dynamisten nach einer Gleichung, die den Fluss dieser kontinuierlichen Substanz durch den Raum unter Verwendung von Begriffen wie Felder, Kraftlinien, Wirbel usw. beschreibt. Faraday und Maxwell sind einige der Prominentesten unter diesen Wissenschaftlern, die diese Argumentation in ihren Arbeiten über Elektrizität vertraten. Deren Ansichten werden im Abschnitt 3.3 und 3.4 vorgestellt.

Obwohl Weber stets einen atomistischen Standpunkt vertreten hatte, drang er durch den Einfluss seines Freundes Gustav Theodor Fechner (1801-1887) doch deutlich tiefer in diese Thematik ein.[2] Fechner arbeitete in vielen Bereichen der Physik, der Physiologie, der Psychologie und der Philosophie. Er war einer der ersten Wissenschaftler, der die Bedeutung der Arbeiten von Ohm erkannte. Er war ein militanter Befürworter des Atomismus und schrieb ein berühmtes Buch zu diesem Thema *Über die physikalische und philosophische Atomenlehre*. Die erste Ausgabe wurde 1855, die zweite 1864 veröffentlicht.[3] In dieser Arbeit entwickelte er das Grundprinzip des Atomismus weiter, um so viele physikalische Phänomene und Naturgesetze erklären zu können. Weiterhin übersetzte er das Buch von Biot *Précis élementaire de Physique expérimentale* ins Deutsche, *Lehrbuch der Experimentalphysik oder Erfahrungs-Naturlehre*. In getrennten, von ihm verfassten Kapiteln stellte Fechner die These auf, dass die Wärmepartikel um Atome kreisen wie die Planeten um die Sonne.[4] Später entwickelte Weber ein ähnliches Modell des Atoms, ersetzte jedoch die Wärmepartikel durch elektrische Teilchen.

Fechner wurde an der Universität Leipzig ausgebildet und später zum Professor für Physik ernannt. Er trat 1839 zurück, nachdem bei ihm eine Augenerkrankung diagnostiziert wurde. Weber war von 1843 bis 1849 an der Universität Leipzig tätig. In dieser Zeit führte er lange Gespräche mit Fechner über Physik und Philosophie. Beide Physiker waren freundschaftlich verbunden und beeinflussten sich gegenseitig.

---

[2] [Hei93] und [Hei04].

[3] [Fec64].

[4] [Bio28, Viertes Schaltkapitel: Über den wahrscheinlichen Grundzustand der Körper, S. 396-411, insbesondere S. 409-410].

Kapitel 3

Die Natur des galvanischen Stroms

Im Folgenden werden die Konzepte zum elektrischen Strom vorgestellt, die von Ørsted, Ampère, Faraday, Maxwell und Weber vertreten wurden. Insbesondere Ørsted, Ampère und Weber vertraten die These, dass der elektrischen Strom aus zwei Strömen von positiven beziehungsweise negativen Ladungsträgern besteht, die sich — relativ zum Leiter — mit gleicher Geschwindigkeit in entgegengesetzter Richtung bewegen. Weber betrachtete später auch die Möglichkeit, dass jede positive Ladung an den Atomen oder Molekülen, aus denen der Leiter beteht, fixiert bleibt, während die negative Ladung in Analogie zu Keplers Planetengesetzen auf elliptischen Bahnen um dieselben kreist. Unter der Einwirkung einer angelegten elektromotorischen Kraft würden sich nur die negativen Ladungen relativ zum Leiter bewegen. Dies war eine der ursprünglichen Überlegungen, die Weber zu seinem Planetenmodell des Atoms geführt haben.

3.1 Ørsteds Auffassung vom elektrischen Strom

Im Jahr 1800 präsentierte Alessandro Volta (1745-1827) der Welt seine Stapel-Batterie oder elektrische Batterie. Mit diesem Gerät wurde eine Energiequelle in Form einer Stromquelle geschaffen, mit der ein relativ konstanter und starker Strom innerhalb eines an den Anschlüssen der Batterie angeschlossenen metallischen Leiterkreises erzeugt werden konnte.[1] Die Batterie erzeugte eine kleine Spannung zwischen ihren Anschlüssen. Volta selbst sprach von einem „Strom der Elektrizität“ durch den an seine Batterie angeschlossenen Leiter.

H. C. Ørsted (1777-1851) war stark durch die romantischen Kultur der deutschen Naturphilosophie beeinflusst, einer philosophischen Tradition des deutschen Idealismus im 19. Jahrhundert. Die hier vertretenen Ideen führten zu der Auffassung einer einheitlichen Natur, wobei alle Phänomene als Ganzes ver-

[1] [Vol00a] und [Vol00b].

bunden sind. Vor allem suchte Ørsted nach Phänomenen, die diese Einheit in verschiedenen Bereichen bezeugten: Wärme, Licht, Elektrizität, Magnetismus, Chemie usw. Im Jahr 1820 beobachtete er die Ablenkung einer magnetischen Nadel von ihrer normalen Orientierung entlang des terrestrischen magnetischen Meridians, sobald durch einen nahe gelegenen, langen geraden Leiter ein elektrischer Strom floss.[2] Mit dieser Entdeckung eröffnete er ein neues Forschungsfeld, das sich mit der Wechselwirkung von Elektrizität und Magnetismus beschäftigte. Er wählte den Namen „Elektromagnetismus“, um dieses neue Gebiet zu kennzeichnen.[3]

Anstelle eines „elektrischen Stroms“ verwendete Ørsted den Ausdruck „elektrischer Konflikt“. Er definierte diesen Begriff wie folgt:[4]

> Man denke sich die beiden entgegengesetzten Enden des galvanischen Apparates durch einen Metall-Draht verbunden. Diesen werde ich der Kürze halber stets den verbindenden Leiter oder den verbindenden Draht nennen; die Wirkung aber, welche in diesem verbindenden Leiter und um denselben her vor sich geht mit dem Namen elektrischer Conflict bezeichnen.

Seine Erklärung für die Abweichung der Magnetnadel von ihrer normalen Ausrichtung in der Nähe eines stromführenden Leiters lautet wie folgt:[5]

> Aus allem diesem lassen sich einige Momente zur Erklärung dieser Erscheinungen ableiten. Der elektrische Conflict vermag nur auf die magnetischen Theile der Materie zu wirken. Alle nicht magnetischen Körper scheinen für den elektrischen Conflict durchgängig zu seyn, die magnetischen Körper dagegen, oder vielmehr ihre magnetischen Theilchen, dem Hindurchgehen dieses Conflictes zu widerstehen, und daher kommt es, dass sie durch den Stoss der kämpfenden Kräfte in Bewegung gesetzt werden können.
>
> Dass der elektrische Conflict nicht in dem leitenden Drahte eingeschlossen, sondern, wie gesagt, zugleich in dem umgebenden Raume ziemlich weithin verbreitet ist, ergiebt sich aus den angeführten Beobachtungen hinlänglich.
>
> Es lässt sich auch aus dem, was beobachtet worden schliessen, dass dieser Conflict in Kreisen fortgehet; denn es scheint ohne diese Annahme nicht zu begreifen zu seyn, wie derselbe Theil des verbindenden Drahtes, der unter einem Pole der Magnetnadel gestellt, diese nach Osten treibt, sie nach Westen bewegen sollte wenn er sich über diesem Pole befindet; eine Kreisbewegung geht aber in den beiden entgegengesetzten Enden eines Durchmessers nach entgegengesetzten Richtungen vor sich. Es scheint überdem, es müsse die Kreisbewegung, verbunden mit der fortschreitenden Bewegung nach der

[2] [Oer20a].
[3] [Ørs98], [GG90, S. 920] und [GG91].
[4] [Oer20a], [Oer20b] und [Oer95].
[5] [Oer20a], [Oer20b] und [Oer95].

> Länge des Leiters, eine Schneckenlinie oder Spirale beschreiben, welches jedoch, wenn ich nicht irre, zur Erklärung der bisher beobachteten Erscheinungen nichts beiträgt.
>
> Alle hier angegebene Wirkungen auf den Nordpol der Nadel lassen sich leicht verstehen, wenn man annimmt, dass die negativ elektrische Kraft oder Materie eine rechts gewundene Spirale durchläuft, und den Nordpol fortstösst, auf den Südpol aber nicht wirkt; und eben so alle Wirkungen auf den Südpol, wenn man der positiv elektrischen Kraft oder Materie eine Bewegung in entgegengesetzter Richtung, und das Vermögen auf den Südpol und nicht auf den Nordpol der Nadel zu wirken, zuschreibt. Von der Uebereinstimmung dieses Gesetzes mit der Natur überzeugt man sieh besser durch Wiederholen der Versuche, als durch eine lange Erklärung. Die Beurtheilung der Versuche würde aber durch Figuren sehr erleichtert werden, welche den Weg, den die elektrischen Kräfte in dem verbindenden Drahte gehen, zeigen.

Im Wesentlichen war somit Ørsted der Auffassung, dass es einen doppelten Strom positiver und negativer Elektrizität gab, wobei sich beide Ströme jeweils in entgegengesetzten Richtungen im Leiter bewegen. Er schrieb der positiven und negativen Elektrizität nicht nur im Draht, sondern auch außerhalb eine „gegensätzliche Bewegung“ zu. Diese Kennzeichnung läßt den Schluß zu, dass Ørsted glaubte, diese entgegengesetzten Elektrizitäten würden sich jeweils mit der gleichen Geschwindigkeit bewegen. Außerhalb des Leiters existieren die gleichen doppelten Ströme, aber hier, so seine Annahme, sei die Bewegung spiralförmig als Überlagerung einer kreisförmigen Bewegung mit einer fortschreitenden Bewegung in der Längsrichtung des Leiters.

3.2 Ampères Auffassung vom elektrischen Strom

A.-M. Ampère (1775-1836) begann seine Forschungen auf dem Gebiet der Elektrodynamik, nachdem Ørsted seine Entdeckung bekannt gemacht hatte. Allerdings widersprach er Ørsteds Idee von der positiven und negativen strömenden Elektrizität außerhalb des Leiters. Er übernahm jedoch die Idee, dass innerhalb des stromführenden Leiters ein doppelter Strom von positiver und negativer Elektrizität mit jeweils entgegengesetzter Richtung entlang des Leiters vorhanden sei:[6]

> [...] somit folgt die Existenz eines doppelten Stromes, der eine von positiver, der andere von negativer Elektrizität, die sich in entgegengesetzter Richtung bewegen, ausgehend von dem Punkt, von dem die elektromotorische Aktion ausgeht, um sich an dem hierzu entgegengesetzten Punkt wieder zu vereinen.[7]

[6] [Amp20a, S. 64], [Far22, S. 112], [Amp65b, S. 141] und [AC15, S. 291].
[7] Übersetzung: H. H.

Die gleiche Idee wurde ein wenig später in der gleichen Arbeit mit ähnlichen Worten dargestellt:[8]

> Derart sind die Unterschiede, die bekanntlich zwischen den beiden soeben gekennzeichneten Zuständen der Elektrizität [d.h. elektrische Spannung und elektrischer Strom] existieren. Der eine Zustand ist einer der Ruhe oder zumindest ein sich nur langsam fortbewegender, allein wegen der Schwierigkeit, solche Körper zu isolieren, in denen elektrische Spannung vorherrscht; der andere Zustand betrifft den doppelten Fluß positiver und negativer Elektrizität längs eines kontinuierlichen Leiterkreises. In der traditionellen Elektrizitätslehre werden diese beiden Ströme, von denen man glaubt, dass sie die Bestandteile derselben sind, in einem Teil des Stromkreises ständig getrennt und im jeweils entgegengesetzter Richtung rasch in den anderen Teil des Leiterkreises befördert, wo sie kontinuierlich wieder vereinigt werden.[9]

3.3 Faradays Auffassung vom elektrischen Strom

Diese Vorstellung vom Strom als Fluss geladener Teilchen wurde nicht von allen Wissenschaftlern der damaligen Zeit akzeptiert. M. Faraday (1791-1867) und J. C. Maxwell (1831-1879) z. B. verwarfen diese Idee. In diesem Abschnitt wird der Standpunkt von Faraday und in dem nächsten der von Maxwell vorgestellt.

Faraday begann seine Arbeit am Elektromagnetismus nach Ørsteds Entdeckung im Jahr 1820. Zunächst wiederholte er einige der wesentlichen Experimente von Ørsted, Ampère, Biot (1774-1862), Savart (1791-1841), Arago (1786-1853), Davy (1778-1829), Wollaston (1766-1828), Berzelius (1779-1848), Berthollet (1748-1822), Schweigger (1779-1857) u.a.. Daraufhin begann er mit eigenen Untersuchungen. In den Jahren 1821 und 1822 veröffentlichte er eine dreiteilige Arbeit, die eine historische Skizze des Elektromagnetismus darstellt.[10] Er war skeptisch gegenüber der Idee, der elektrische Strom sei eine Bewegung geladener Teilchen. Beim Betrachten einer aktiven Apparatur, bestehend aus einem die Pole einer Voltaschen Batterie verbindenden metallischen Drahtes, formulierte er seine Skepsis wie folgt:[11]

> Diejenigen, die Elektrizität als eine Flüssigkeit oder als zwei Flüssigkeiten betrachten, nehmen an, dass ein Strom oder Ströme von Elektrizität zwischen den Polen eines aktiven Apparates fließen. Es gibt viele Argumente, die für Elektrizität als Strom von Materie sprechen, und nur wenige dagegen; aber schließlich ist es nur eine Vermutung; und es soll auch daran erinnert werden, während wir die Erforschung des Elektromagnetismus vorantreiben, dass wir keinen Beweis für die

[8] [Amp20a, S. 68-69], [Amp65b, S. 144] und [AC15, S. 293].
[9] Übersetzung: H. H.
[10] [Far21a, Far21b, Far22].
[11] [Far21a, S. 196].

> Materialität der Elektrizität haben, noch für die Existenz eines Stromes durch den Draht.[12]

In Bezug auf Ørsteds Erklärung der Ablenkung einer magnetischen Nadel durch einen elektrischen Strom erklärte er:[13]

> [...] Ich kann wenig zu der Theorie von M. Oersted sagen, denn ich muss gestehen, dass ich sie nicht ganz verstehe.

Anstatt die Ablenkung der Magnetnadel wie Ørsted durch einen *elektrischen* Konflikt zu erklären, bevorzugte Faraday die Idee einer *magnetischen* Kraft.[14]

Faraday kannte Ørsteds und Ampères Konzept eines doppelten Stroms. Er legte jedoch den Schwerpunkt auf den Zustand eines stromführenden Leiters, der die Ablenkung einer magnetischen Nadel bewirkt. In Bezug auf Ampères Erläuterung zu diesem Zustand äußerte er:[15]

> Da nun in diesem Zustand der Draht die magnetische Nadel beeinflussen kann, ist es für das genaue Verständnis der Theorie sehr wichtig, dass eine klare und genaue Vorstellung von seinem Zustand oder von dem, was als sein Zustand angenommen wird, gewonnen wird, denn darauf gründet sich die ganze Theorie. Anteile von Materie im gleichen Zustand wie dieser Draht können die Versatzstücke bilden, aus denen M. Ampère theoretisch nicht nur Stabmagnete, sondern sogar den großen Magneten der Erde formt; wir dürfen daher erwarten, dass eine sehr klare Beschreibung dieses Zustandes angegeben wird. Dies ist jedoch nicht der Fall und ist, wie ich glaube, sehr zu bedauern, da es den Rest der Theorie weitgehend im Unklaren lässt, denn obgleich die höchst interessanten Tatsachen, die M. Ampère entdeckt hat, sowie die allgemeinen Gesetze und Anordnungen sowohl in Leitern als auch in Magneten sicherlich beschrieben werden können auf der Basis der gleichen Kraft und Auswirkung ohne irgendeinen Verweis auf den inneren Zustand des Drahtes, sondern nur auf die Kräfte, die, wie das Experiment beweist, damit verbunden sind, sich aber M. Ampère immer nur auf die Ströme im Draht bezieht und seine Theorie tatsächlich auf deren Existenz gründet, ist es erforderlich, dass *ein Strom* genauer beschrieben wird.[16]

Im Jahr 1833 definierte Faraday den elektrischen Strom wie folgt:[17]

> 283. Unter *Strom* verstehe ich irgend ein Fortschreitendes, sei es nun ein elektrisches Fluidum oder zwei in entgegengesetzter Richtung

[12] Übersetzung: H. H.
[13] [Far22, S. 107].
[14] [Wie88] und [Wie91].
[15] [Far22, S. 112].
[16] Übersetzung: H. H.
[17] [Far89, Artikel 283], [Far52, Artikel 283] und [Far65a, Artikel 283].

> sich bewegende Fluida, oder bloss Schwingungen, oder, noch allgemeiner gesprochen, fortschreitende Kräfte. Unter *Anordnung* verstehe ich eine örtliche, nicht progressive Vertheilung von Partikeln, oder Fluidis oder Kräften. Noch viele andere Gründe liessen sich für die Ansicht, dass ein *Strom* etwas Anderes sei als eine *Anordnung*, geltend machen, allein ich vermeide ängstlich jede unnöthige Auslassung, die Anderen sofort einfallen wird.

Ampères Erklärung von Ørsteds Experiment basierte auf einer direkten Wechselwirkung zwischen elektrischen Strömen, das heißt, auf einer Fernwirkung, wie die Newtonsche Wechselwirkung zwischen zwei Massen oder die Coulombsche Wechselwirkung zwischen zwei elektrischen Flüssigkeiten. Faraday dagegen konzentrierte seine Aufmerksamkeit auf das Medium zwischen den wechselwirkenden Körpern. Im Hinblick auf die Elektrizität konzentrierte er sich insbesondere auf die grundlegenden Phänomene der *elektrostatischen Induktion*, bei denen immer die gleiche und entgegengesetzte Menge an Elektrizität erzeugt wird. Faraday zufolge findet diese elektrische Polarisation auch im Medium zwischen zwei geladenen Körpern statt. In einer Veröffentlichung aus dem Jahr 1837 äußerte er seine Ansichten wie folgt:[18]

> 1162. Unter den mannigfachen Wirkungen der Elektricität, die man herkömmlich unterscheidet, ist, glaube ich, keine, welche an Wichtigkeit überragt oder auch nur gleichkommt derjenigen, welche man *Induction* nennt. [...] und da der ganze Effect in dem Elektrolyt darauf zu beruhen scheint, dass die Theilchen in einen besonderen oder polarisirten Zustand gerathen, so bin ich zu der Vermuthung geführt worden, dass gewöhnliche Induction selbst in allen Fällen eine *Wirkung an einander stossender Theilchen*[19] sei, und dass elektrische Wirkung in die Ferne (d. h. gewöhnliche Induction) immer nur durch den Einfluss einer dazwischenliegenden Substanz erfolge. [...] Nunmehr glaube ich, dass gewöhnliche Induction nicht eine auf merkliche Entfernungen sich erstreckende Wirkung der kleinsten Theilchen oder der Massen sei, sondern in allen Fällen eine in einer Art von Polarisation bestehende Wirkung an einander stossender Theilchen; und wenn diese Ansicht richtig ist, so muss die Erkenntniss und Feststellung derselben auf den weiteren Fortgang unserer Erforschung der Natur der elektrischen Kräfte von dem grössten Einfluss sein.

Im Jahr 1838 untersucht Faraday die elektrostatische Induktion in Bezug auf Isolierung und Leitung und fasste dabei seine bis dahin entwickelten Auffassungen über den elektrischen Strom zusammen. Anstelle eines Flusses von

[18] [Far89, Artikel 1162, 1164 und 1165], [Far52, Artikel 1162, 1164 und 1165] und [Far65a, Artikel 1162, 1164 und 1165].

[19] [Anmerkung von Faraday:] Der Ausdruck *an einander stossend (contiguous)* ist vielleicht nicht der beste, welcher hier und sonst hätte bebraucht werden können; denn da die Theilchen sich nicht berühren, so ist er nicht ganz correct. Ich habe ihn gewählt, weil er in seiner allgemeinen Bedeutung mich in den Stand setzt, die Theorie klar und leicht auseinanderzusetzen. Ich verstehe darunter solche Theilchen, welche einander die nächsten sind.—Dec. 1838.

geladenen Teilchen dachte er sich den elektrischen Strom als eine elektrische Polarisation der Teilchen des Mediums, die nacheinander zu benachbarten Teilchen übertragen wird. Nach seiner Auffassungen konnten die Teilchen eines guten Leiters nicht dauerhaft polarisiert werden. Er äußerte sich wie folgt:[20]

> 1320. Obschon Isolation und Conduction als wesentlich verschieden angenommen werden, so haben doch weder Cavendish noch Poisson durch ihre Theorie zu erklären versucht, noch auch nur angegeben, worin denn der wesentliche Unterschied besteht. Auch ich habe in dieser Hinsicht kaum etwas zu bieten, *ausgenommen*, dass nach meiner Theorie über Induction, Isolation und Conduction auf demselben molecularen Vorgang der betreffenden Dielektrica beruhen, beide nur extreme Grade *eines und desselben Zustandes* oder Effectes sind und in jeder zulänglichen mathematischen Theorie der Elektricität als Fälle gleicher Art betrachtet werden müssen. [...]
>
> 1338. Um das Gesagte kurz zusammenzufassen, so stelle ich mir vor, dass die erste Wirkung eines elektrisirten Körpers auf benachbarte Körper in der Hervorrufung eines Polarisationszustandes ihrer Theilchen besteht, und das ist *Induction*; sie beginnt mit einer Wirkung auf die in unmittelbarer Berührung mit jenem befindlichen Theilchen, welche wiederum auf die an sie grenzenden Theilchen wirken, und so pflanzen sich die Kräfte in die Ferne fort. Bleibt die Induction ungeschwächt, so bedeutet dies vollkommene Isolation, und je höher der Polarisationszustand ist, welchen die Theilchen annehmen oder unterhalten können, desto höher ist die Intensität, welche den wirkenden Kräften gegeben werden kann. Wenn dagegen die an einander grenzenden Theilchen nach Annahme des Polarisationszustandes die Fähigkeit haben, ihre Kräfte mitzutheilen, so findet Leitung statt, und die Spannung ist vermindert, denn Leitung ist ein besonderer Entladungsvorgang zwischen benachbarten Theilchen. Je niedriger der Spannungszustand ist, bei welchem diese Entladung zwischen den Theilchen eines Körpers stattfindet, ein desto besserer Leiter ist dieser Körper. Unter diesem Gesichtspunkte lassen sich Isolatoren als Körper bezeichnen, deren Theilchen in dem Polarisationszustande verharren können, während Leiter solche sind, deren Theilchen nicht dauernd polarisirt werden können. [...]

3.4 Maxwells Auffassung vom elektrischen Strom

Maxwell folgte der Idee Faradays und versuchte, sie mathematisch umzusetzen. Die Existenz von diskontinuierlichen Mengen von Elektrizität mit einer körnigen Struktur oder einer atomistischen Eigenschaft passte nicht in sein Konzept der

[20] [Far89, Artikel 1320 und 1338], [Far52, Artikel 1320 und 1338] und [Far65a, Artikel 1320 und 1338].

Elektrizität.[21] Wie Faraday wies Maxwell die materielle Vorstellung von Elektrizität zurück und bestritt die Existenz von elektrischen Atomen.[22] Dies wird erkennbar aus seinen Betrachtungen zur elektrolytischen Leitung. Das grundlegende Gesetz der Elektrolyse war von Faraday entdeckt worden. Maxwell beschrieb es mit folgenden Worten:[23]

> *Die Zahl der electrochemischen Aequivalente eines Electrolyts, welche von einem Strome während einer gegebenen Zeit zerlegt werden, ist gleich der Zahl von Einheiten von Electricität, die der Strom in derselben Zeit durch einen Querschnitt des Electrolyts hindurchführt.*

Im selben Artikel präsentierte er eine mögliche Erklärung dieser Tatsache:[24]

> Man wird daher unwillkürlich zu der Annahme gedrängt, dass die Ströme von Ionen Convectionsströme für die Electricität bilden, und speciell, dass alle Molekel aller Kationen mit einer und derselben unveränderlichen Menge positiver Electricität geladen sind, und dass ebenso alle Molekel aller Anionen dieselbe unveränderliche Menge negativer Electricictät enthalten.

Maxwell beschrieb dieses atomare Bild der Elektrolyse als äußerst nützlich, um dieses Phänomen zu verstehen. Aber bald nach diesem Zitat findet sich der folgenden Kommentar von ihm, der seine skeptische Haltung deutlich macht:[25]

> Allein so leicht es ist, von einer molecularen Ladung zu sprechen, so schwer ist es, die Existenz einer solchen zu begreifen.

Die gleiche skeptische Einstellung wird am Ende dieses Artikels deutlich:[26]

> Es ist sehr wenig wahrscheinlich, dass diese eben dargestellte Theorie der moleculare Ladungen in irgend einer Form wird beibehalten werden können, wenn wir erst zu einer wirklichen Einsicht in die Natur der Electrolyse gelangt sein werden. Denn wenn wir erst soweit sind, werden wir auch eine sichere Basis für eine Theorie der electrischen Ströme gewonnen und so alle solche provisorischen Theorieen nicht mehr nötig haben.
>
> Man kann aber diese Theorie von den molecularen Ladungen wenigstens dazu benutzen, um dem Gedächtnis viele Tatsachen aus der Lehre von der Electrolyse einzuprägen.

Maxwell behandelte die Natur des elektrischen Stroms in vielen Abschnitten seines Buches *Lehrbuch der Electricität und des Magnetismus* von 1873. Im

[21] [Wie67, S. 109].
[22] [Wie08, S. 153].
[23] [Max54a, Artikel 255] und [Max83a, Artikel 255, S. 393].
[24] [Max54a, Artikel 255] und [Max83a, Artikel 255, S. 393].
[25] [Max54a, Artikel 260, S. 380], [Max83a, Artikel 260, S. 396] und [Wie60, S. 154-155].
[26] [Max54a, Artikel 260, S. 381], [Max83a, Artikel 260, S. 398] und [Wie60, S. 154-155].

Artikel 552 dieser Arbeit stellt er Überlegungen an zu der Frage, ob die mit einem Strom verbundene Energie intern zum Strom gehört oder extern ist:[27]

> **552.** Demnach scheint ein System, das einen electrischen Strom enthält, der Sitz von Energie einer besondern Art zu sein. Man kann aber einen electrischen Strom nicht anders, denn als kinetische Erscheinung auffassen,[28] seine Energie muss also kinetische Energie, das heisst Energie von der Form sein, wie sie ein Körper, wenn er sich bewegt, in Folge seiner Bewegung besitzt. Da aber einerseits die Energie eines sich bewegenden Körpers in keiner Weise von dem, was ausser ihm vorhanden ist, abhängt, und andererseits bei einem Strom die Gegenwart anderer Körper, wie wir wissen, seine Energie beeinflusst, so kann die in dem Leiter sich bewegende Electricität nicht als Träger der kinetischen Energie des Stromes betrachtet werden.
>
> Dieser Zwiespalt veranlasst uns zu untersuchen, ob nicht, wenn ein Strom durch einen Leiter fliesst, in dem Raume ausserhalb dieses Leiters, wo also der Strom nicht vorhanden ist, wo aber seine electromagnetischen Wirkungen sich abspielen, irgend welche Bewegungsvorgänge sich zeigen.

Im Kapitel VI des zweiten Bandes seines Buches, Artikel 568 bis 577, listet Maxwell drei Wirkungen auf, die sich zeigen sollten, falls der elektrische Strom aus sich bewegenden trägen Massen zusammengesetzt ist:[29]

> *Der electrische Strom hat kein Bewegunsmoment.* Bis jetzt hat man trotz dieses markanten Signalements eine Trägheitswirkung des Stromes nicht entdecken können. Sollte aber doch eine solche durch noch bedeutend verfeinerte Beobachtungsmittel gefunden werden, so würden wir eine der beiden Electricitätsarten, die positive oder negative als reelle Substanz ansehen müssen. Wir könnten dann den electrischen Strom als die wirkliche nach einer gewissen Richtung vor sich gehende Bewegung dieser Substanz ansehen.
>
> [...]
>
> Doch glaube ich, dass man zwar von den vielen Vorteilen, die die Analogie zwischen den Bewegungen der Electricität und denen der materiellen Flüssigkeiten bietet, im weitesten Umfange Gebrauch machen darf, dass man sich aber hüten muss, aus dieser Analogie fundamentale Schlüsse zu ziehen, für die man keinen experimentellen Beweis besitzt. Bis jetzt aber existirt noch keine durch den Versuch zu bewahrheitende positive Tatsache,[30] die den electrischen

[27] [Max54b, Artikel 552] und [Max83b, Artikel 552, S. 239].
[28] [Anmerkung von Maxwell:] Faraday, *Exp. Res.* (283).
[29] [Max54b, Artikel 574, S. 218] und [Max83b, Artikel 574, S. 264-265].
[30] [Anm. d. Uebers.] Siehe jedoch die Abhandlungen von Herz und von Colley, *Wiedemanns Annalen* Bd. 14 S. 190, bezüglich Bd. 17 S. 55.

Strom wirklich als Strom materieller Flüssigkeit erscheinen lässt, ebenso wenig hat man einen Beweis, dass jeder Strom, wie Fechner will, aus zwei gleich starken entgegengesetzt gerichteten Strömen besteht, man weiss auch nicht, ob ein electrischer Strom sich rasch oder langsam bewegt.

> Erst wenn wir einen sicheren Beweis für die materielle Beschaffenheit der Electricität besitzen, wird sich die dynamische Theorie der Electricität in Vollständigkeit bearbeiten lassen. Man wird dann die Wirkungen der Electricität nicht mehr, wie es hier, in diesem Werke, noch geschehen muss, einem unbekannten Etwas, das nur den allgemeinen Gesetzen der Dynamik folgt, zuzuschreiben brauchen. Man wird sie aus bekannten Bewegungen bekannter Teile von Materie ableiten, und nicht, wie das ebenfalls hier noch geschehen muss, bei dem Totaleffect und den Schlussresultaten stehen bleiben, sondern den ganzen innern Mechanismus und alle Details der Bewegung der Untersuchung unterwerfen können.

Die Experimente, die bis zur Zeit von Maxwell durchgeführt wurden, zeigten keinen dieser drei Effekte. Erst in den 1910er- und 1920er-Jahren konnten Tolman und andere die reale Existenz all dieser Effekte zeigen und so die reale Existenz der trägen Masse der Ladungsträger, der Elektronen, in metallischen Leitern nachweisen.[31] Zur Entdeckung der Elektronen siehe auch die Arbeit von Wiederkehr.[32]

Wie aus diesem letzten Zitat deutlich wird, betrachtete Maxwell den elektrischen Strom in seinem *Lehrbuch der Electricität und des Magnetismus* nicht als das Ergebnis eines Flusses geladener Materie, sondern nur auf der Grundlage der allgemeinen Gesetze der Dynamik.

3.5 Webers ursprüngliche Auffassung vom elektrischen Strom

Im Gegensatz zu Faraday und Maxwell akzeptierte Weber die Vorstellung von sich bewegenden elektrizierten Teilchen als Erklärung für den elektrischen Strom. Außerdem betrachtete er die Strömung als korpuskular oder atomar strukturiert.[33] Anfangs konzentrierte er seine Aufmerksamkeit nur auf die positiven und negativen Ladungen dieser Korpuskeln, sowie auf ihre Geschwindigkeiten relativ zum Draht. Später wies er diesen geladenen Teilchen sogar explizit eine träge Masse zu. Im folgenden Abschnitt wird seine anfängliche Vorstellung vom elektrischen Strom vorgestellt.

Webers erste große Abhandlung wurde 1846 veröffentlicht. Sie wurde in einer Veröffentlichung von Fechner im Jahr 1845 angekündigt, in der ein Zusammenhang zwischen den elektrodynamischen Phänomenen von Ampère und jenen von

[31] [TOS14], [TKG23], [TMS26], [TS16] und [O'R65].
[32] [Wie99].
[33] [O'R65, Band I, Kapitel VII, Abschnitt 1: Atomism in electricity].

Faraday im Jahre 1831 entdeckten induzierten Strömungen aufgezeigt wurde. Fechner zerlegte jedes Stromelement in zwei Teilchen mit gleich großen, aber entgegengesetzten elektrischen Ladungen, die sich relativ zum Leiter mit der gleichen Geschwindigkeit, aber in entgegengesetzter Richtung bewegen.[34] Weber akzeptierte zunächst diese Annahme eines symmetrischen Doppelstroms. Bei seiner Diskussion der Ampèreschen Kraft zwischen zwei speziellen Stromelementen nahm er zunächst an, dass jedes Stromelement aus positiven und negativen Ladungen besteht, die sich relativ zum Draht mit der gleichen, aber entgegengesetzten Geschwindigkeit bewegen. Dies kann aus seinem folgenden Text entnommen werden:[35]

> Richten wir nun unsere Aufmerksamkeit auf die *elektrischen Fluida* in den beiden Stromelementen selbst, so haben wir in denselben gleiche Mengen positiver und negativer Elektricität, welche sich in jedem Elemente in entgegengesetztem Sinne bewegen. Diese gleichzeitige entgegengesetzte Bewegung positiver und negativer Elektricität, wie man sie in allen Theilen eines linearen Leitungsdrahts anzunehmen pflegt, kann in der Wirklichkeit zwar nicht existiren, kann aber für unseren Zweck als eine *ideale* Bewegung angesehen werden, welche in den von uns betrachteten Fällen, wo es sich blos um Wirkungen *in der Ferne* handelt, die wirklich vohandenen Bewegungen in Beziehung auf alle in Betracht zu ziehenden Wirkung *vertritt*, und dabei den Vorzug hat, sich besser der Rechnung unterwerfen zu lassen. Die wirklich vorhandenen *Seitenbewegungen*, durch welche die sich begegnenden Theilchen in dem, *keine mathematische Linie* bildenden, Leitungsdrahte einander *ausweichen*, dürfen als ohne Einfluss auf die Wirkungen *in die Ferne* betrachtet werden, daher es für unseren Zweck zulässig erscheint, an obige einfache Ansicht der Sache uns zu halten.

Weber hat dieses ideale Modell folgendermaßen beschrieben:[36]

> Bezeichnen e und e' die positiven elektrischen Massen in beiden Elementen, und u und u' die zugehörigen *absoluten* Geschwindigkeiten, die je nach der Richtung des Stroms einen positiven oder negativen Werth haben, so werden $-e$ und $-e'$ die negativen Massen, und $-u$ und $-u'$ die ihnen zugehörigen *absoluten* Geschwindigkeiten sein.

Das heißt, ein bestimmtes Element besteht aus entgegengesetzten Ladungen e und $-e$, die sich relativ zum Draht mit gleichen, aber entgegengesetzten Geschwindigkeiten u bzw. $-u$ bewegen. In der gleichen Arbeit hat Weber diese Tatsache mit den folgenden Worten ausgedrückt (unsere Kommentare in den Fußnoten):[37]

[34] [Fec45].
[35] [Web46, Webers *Werke*, Band 3, S. 135-136] und [Web07, S. 83].
[36] [Web46, Webers *Werke*, Band 3, S. 139] und [Web07, S. 85].
[37] [Web46, Webers *Werke*, Band 3, S. 203] und [Web07, S. 133].

> Nach den S. 135, 139 gegebenen Bestimmungen[38] soll in jedem Stromelemente *gleich viel* positive und negative Elektricität enthalten sein, und beide sollen mit *gleicher Geschwindigkeit*, aber in entgegengesetztem Sinne, das Element durchströmen.

Weber hat diese Idee einer Doppelströmung auch in seinen Arbeiten in der Zeit von 1855 bis 1857 vorgestellt, während derer er mit seinem Freund R. Kohlrausch (1809-1858) die Messung der Weberschen Konstante durchführte.[39] Die folgenden Zitate stammen aus der Arbeit von 1856 (unsere Kommentare in eckigen Klammern):[40]

> Wir denken uns in den die [galvanische] Kette konstituirenden Körpern ihre *neutrale* Elektricität in Bewegung, in der Art, dass deren gesammter positiver Theil nach der einen Richtung sich in geschlossenem, zusammenhängendem Kreise herumschiebt, der negative nach der entgegengesetzten Richtung. [...] Dieses Maass, welches das *mechanische Maass* der Stromintensität heissen soll, setzt also *die Intensität desjenigen Stroms zur Einheit, welcher entsteht, wenn in der Zeiteinheit die Einheit der freien positiven Elektricität in der einen Richtung, eine gleiche Menge negativer Elektricität in der entgegengesetzten Richtung durch jeden Querschnitt der Kette fliesst.*

In seiner Arbeit von 1846 kennzeichnete er diese angebliche gleichförmige Bewegung als eine Idealisierung. In der Tat seien die realen Bewegungen der Ladungen selbst bei stetigen Strömungen nicht konstant:[41]

> Nach den im 19. Artikel von galvanischen Strömen gegebenen Bestimmungen, welche der Betrachtung über das elektrische Gesetz zweier aus der Ferne auf einander wirkender Massen zum Grunde gelegt worden sind, ist an die Stelle des *wirklichen* Stroms, in welchem die Geschwindigkeit der strömenden Elektricität beim Uebergange von einem ponderablen Theilchen zum anderen wahrscheinlich einem *stetigen Wechsel* unterworfen ist, ein *idealer* Strom von *gleichförmiger* Geschwindigkeit gesetzt worden. Diese Substitution war zur Vereinfachung der Betrachtung nöthig und schien gestattet zu sein, weil es sich blos um Wirkung *in der Ferne* handelte.

Weber hat in seiner Arbeit von 1846 vielfach das Adjektiv *ponderabel* verwendet: für Körper, für Leiterbestandteile oder Leitungsdrahtelemente, für Teilchen und für Moleküle. Er meinte wahrscheinlich mit diesem Adjektiv „mit beträchtlichem Gewicht“ oder „wägbar“, im Gegensatz zu elektrischen Teilchen, die zu den stromführenden Elementen gehören und von denen angenommen wurde, dass sie praktisch keine Masse hätten oder dass deren Masse vernachlässigbar sei. Für diese letzteren Teilchen nutzte er das Adjektiv imponderabel:[42]

[38] [Web46, Webers *Werke*, Band 3, S. 135 und 139].
[39] [Web55, Webers *Werke*, Band 3, S. 594], [WK56, Webers *Werke*, Band 3, S. 597-598].
[40] [WK56, Webers *Werke*, Band 3, S. 597-598].
[41] [Web46, Webers *Werke*, Band 3, S. 207-208] und [Web07, S. 137].
[42] [Web46, Webers *Werke*, Band 3, S. 133] und [Web07, S. 82].

> Das Ampère'sche Gesetz lässt nichts zu wünschen übrig, sobald es sich um die Wechselwirkungen von Leitungsdrähten handelt, deren Ströme eine *unveränderliche Intensität* besitzen, und die selbst *in ihrer Lage* gegen einander *beharren*; sobald aber Aenderungen von Stromintensitäten eintreten, oder die Leitungsdrähte gegen einander bewegt werden, giebt das Ampère'sche Gesetz von der Erscheinungen keine vollständige und genügende Rechenschaft; es lehrt dann nämlich blos die Wirkungen kennen, welche auf das *ponderable* Drahtelement, nicht aber die Wirkungen, welche auf die darin enthaltene *impoderable* Elektricität Statt finden. Es geht also hieraus hervor, dass dieses Gesetz nur als ein Partikulargesetz Gültigkeit besitzt, und nur provisorisch für ein Grundgesetz genommen werden darf, welches durch ein wirklich allgemein gültiges, auf alle elektrodynamischen Erscheinungen anwendbares definitives Grundgesetz noch zu ersetzen ist.

Es ist erstaunlich, dass Weber selbst in diesem ersten Artikel bereits von den Modellen von Ørsted und Ampère abgewichen ist, indem er die Möglichkeit positiver und negativer Ladungen mit unterschiedlichen Massen in Betracht zog (siehe das nächste Zitat). Wäre dies der Fall, so würden sie sich bei einem konstanten Strom innerhalb eines Leiters mit Geschwindigkeiten unterschiedlicher Größe bewegen:[43]

> Unter einem *galvanischen Strome*, im Gegensatze zu anderen unter diesem Namen nicht mit begriffenen elektrischen Bewegungen, sei eine solche Bewegung der Elektricität in einem geschlossenen Leiter zu verstehen, dass alle Querschnitte des letzteren gleichzeitig von gleichen Mengen positiver und negativer Elektricität in entgegengesetztem sinne durchflossen werden. Diese Gleichheit der *durchfliessenden* positiven und negative Massen setzt nicht nothwendig die Gleichheit der *strömenden* positiven und negativen Massen voraus, die bisher angenommen wurde, sondern kann auch bei ungleicher Grösse der letzteren bestehen, wenn die *grössere* Masse *langsamer*, die *kleinere schneller* fliesst.

Dies ist eine großartige Einsicht, die er später weiterentwickelt hat. Bevor diese späteren Entwicklungen vorgestellt werden, muss noch die Natur der molekularen Ströme erläutert werden. Webers Konzept bezüglich dieser molekularen Ströme stellt einen ersten Schritt in Richtung der Entwicklung eines Planetenmodells des Atoms dar.

[43] [Web46, Webers *Werke*, Band 3, S. 204] und [Web07, S. 134].

Kapitel 4

Die Natur der molekularen Ströme

4.1 Die Auffassung Ampères von den molekularen Strömen

Es war seit Jahrhunderten bekannt, dass die Erde eine Magnetnadel entlang des lokalen magnetischen Meridians orientiert. Wird die Magnetnadel im Ruhezustand außerhalb der lokalen Ebene des magnetischen Meridians ausgerichtet, so wird sie von der Erde in Richtung des lokalen magnetischen Meridians abgelenkt. Ørsteds Experiment von 1820 zeigte die Ablenkung einer magnetischen Nadel durch einen in der Nähe befindlichen elektrischen Strom. Ampère verfolgte diese Idee einen Schritt weiter und vermutete, dass die magnetischen Eigenschaften der Erde durch elektrische Ströme bedingt sein könnten, die innerhalb der Erde in Ebenen parallel zum Äquator zirkulieren.[1] Er argumentierte wie folgt (zitiert in Darrigol):[2]

> Wenn akzeptiert wird, dass die Reihenfolge, in der zwei Tatsachen entdeckt wurden, keinen Unterschied in den zur Verfügung stehenden Analogien macht, könnten wir annehmen, dass, bevor wir über die Süd-Nord-Ausrichtung einer magnetisierten Nadel wussten, wir bereits die Eigenschaft der Nadel kannten, eine senkrechte Position zu einem elektrischen Strom einzunehmen. [...]. Wäre es für Jemanden, der diese Süd-Nord-Ausrichtung erklären will, am einfachsten, einen elektrischen Strom im Innern der Erde anzunehmen?[3]

Da ein Stabmagnet ebenfalls eine magnetische Nadel ablenkt, war der nächste Schritt für Ampère die Existenz von elektrischen Strömen anzunehmen, die die

[1] [Wie88], [Ste03] und [Ste05].

[2] [Dar00, S. 6]. Siehe auch [Amp20b, S. 202-203], [Amp65a, S. 152], [Blo82, S. 72-73] und [AC15, S. 303-304].

[3] Übersetzung: H. H.

magnetische Achse des magnetischen Stabes in Ebenen senkrecht zu dieser Achse umfließen. Dann postulierte er, dass die magnetische Wechselwirkung zwischen zwei Magneten oder zwischen einer magnetischen Nadel und der Erde nur auf der Wechselwirkung zwischen den elektrischen Strömen zurückzuführen seien, die innerhalb dieser Körper existieren. Dies legte einen Test dieser Hypothese nahe, nämlich den, nach einer direkten Wechselwirkung zwischen zwei elektrischen Strömen zu suchen. Bis zu diesem Zeitpunkt war keine Interaktion dieser Art jemals beobachtet worden.

Im Jahr 1820 formte Ampère zwei Leiter zu flach aufgerollten Spiralen und positionierte sie parallel zu einander in gegenüberliegenden Ebenen. Eine dieser Spiralen wurde im Labor fixiert, während die andere sich der ersten Spirale nähern oder sich von dieser wegbewegen konnte. Indem er einen elektrischen Strom durch beide Spiralen fließen ließ, war er in der Lage, eine Anziehung oder Abstoßung zwischen ihnen nachzuweisen, abhängig von der Richtung der Ströme.[4] Dieses entscheidende Experiment schuf ein neues Forschungsfeld, nämlich der Wechselwirkung zwischen zwei stromführenden Drähten. Weiterhin zeigte er, dass sich auch zwei gradlinige parallele stromführende Leiter gegenseitig anziehen, wenn die Ströme in die gleiche Richtung fließen, und sich gegenseitig abstoßen, wenn sie in entgegengesetzter Richtung fließen.[5]

Um dieses neue Forschungsgebiet zu charakterisieren, wurden von Ampère die Namen „Elektrostatik“ und „Elektrodynamik“ eingeführt.[6] Das Feld der Elektrostatik beschreibt die Wechselwirkung zwischen ruhenden Ladungen, während das der Elektrodynamik die Wechselwirkung zwischen bewegten Ladungen charakterisiert, wie z. B. die Wechselwirkung zwischen zwei stromführenden Leitern.

Ampères Spekulationen von 1820 über makroskopische elektrische Ströme innerhalb von Magneten wurden von seinem Freund A. Fresnel (1788-1827) kritisiert.[7] Fresnels Ausführungen wurden erst 1885 veröffentlicht.[8] Zum Beispiel wies Fresnel darauf hin, dass, wenn der Magnetismus eines Stabmagneten auf elektrische Kreisströme von makroskopischen Abmessungen zurückzuführen sei, sollten thermische Effekte innerhalb des Magneten festzustellen sein. Aber diese Effekte wurden nicht beobachtet. Um den Einwand von Fresnel zu entkräften, akzeptierte Ampère seinen Vorschlag vom Januar 1821, und nahm nun an, dass die für die magnetischen Phänomene in magnetisierten Stäben verantwortlichen Ströme beschränkt seien auf molekulare Dimensionen und sich in diesen Dimensionen um die Achsen von jedem Molekül oder anderer Bestandteile des Magneten herum bewegen.

In seiner Hauptarbeit von 1826 hat Ampère seine Vorstellung von molekularen Strömen in folgender Weise formuliert:[9]

---

4 [Amp20b] und [AC15, Kapitel 25].

5 [Amp20a] und [AC15, Kapitel 24].

6 [Amp22a], [Blo82, S. 78] und [AC15, Abschnitt 1.4].

7 [Blo82, S. 98-101 und 118-125], [Hof82, S. 334 und 343], [Hof87] und [Hof96, S. 282-290].

8 [Fre85a] und [Fre85b].

9 [Amp26, S. 105 und 116], [Amp23, S. 277 und 288], [Amp65b, S. 192 und 196] und [AC15, S. 412 und 418].

> Um die Art und Weise zu begründen, in der ich magnetische Phänomene konzipiere, in Bezug auf Magnete als Anordnungen von elektrischen Strömen, die winzige Kreise um ihre Teilchen bilden, [...] und die Art und Weise, in der ich magnetische Phänomene erklärt habe als verbunden mit sehr kleinen geschlossenen elektrischen Kreisströmen um runde Teilchen eines magnetisierten Körpers, [...][10]

4.2 Webers Auffassung vom Ursprung des Widerstands elektrischer Leiter

Im Jahr 1852 veröffentlichte Weber eine zweite große Abhandlung mit dem Titel: *Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere Widerstandsmessungen.*[11] Nach dem Ohmschen Gesetz von 1826 entsteht in einem Leiter ein konstanter Strom, wenn eine elektromotorische Kraft oder Spannung angelegt wird.[12] Weber wollte den Ursprung dieses Widerstandes verstehen und zwar in Begriffen mikroskopischer Kräfte, die auf die fließenden Ladungen einwirken. Nach Weber entsteht dieser Widerstand in einem metallischen Leiter durch eine kontinuierliche Verbindung und Trennung von positiven und negativen Ladungen, die in einem Doppelstrom aufeinandertreffen. Dies ist in gewisser Weise dem Ørstedschen Konflikt oder dem Modell eines elektrischen Stroms von Ampère ähnlich.

Im Innern eines Leiters, an den eine elektromotorische Kraft angelegt wird, erfahren die beweglichen Ladungen einen Widerstand gegen ihre fortschreitende Bewegung in Richtung des Leiters. Um einen konstanten Strom innerhalb eines Widerstandsdrahtes zu erhalten, ist eine konstante elektromotorische Kraft oder eine konstante Spannung zwischen den Enden des Leiters erforderlich. Weber war als Atomist mit der bloßen Aussage dieses empirischen Gesetzes nicht zufrieden. Er wollte das Wesen des Widerstandes in Form von atomaren oder molekularen Prozessen innerhalb des Drahtes finden oder klären. Seine Arbeit von 1852 hatte zum Ziel, die Ursprünge der Widerstandsfähigkeit von Metallen zu ergründen. Er formulierte wie folgt:[13]

36.

Ueber die Ursachen des Widerstands der Leiter.

> Zu einer vollständigen Kenntniss des Widerstands genügt es nicht, die Grösse des Widerstands aus seinen Wirkungen zu definiren, d. i. aus der Stärke des durch eine gegebene elektromotorische Kraft hervorgebrachten Stroms, sondern es gehört auch dazu, die Grösse des Widerstands aus ihren Ursachen zu definiren. Ohne diese wesentliche Ergänzung ist unsere Kenntniss von dem Wesen des Widerstands mangelhaft, und die ermittelte Grösse desselben ist eine

[10] Übersetzung: H. H.
[11] [Web52b].
[12] [Ohm26], [Fec] und [Ram].
[13] [Web52b, Webers *Werke*, Band 3, Abschnitt 36, S. 400-403].

blosse Hülfsgrösse der Elektrodynamik, deren wahre physische Bedeutung noch unbekannt ist. Wenn nun der Widerstand bisher blos nach seinen Wirkungen betrachtet worden ist, so liegt der Grund davon darin, dass über die Ursachen desselben bisher noch gar nichts Wesentliches ermittelt worden ist. Es ist blos die Abhängigkeit des Widerstands von den äusseren Dimensionen des Leiters, nämlich von seiner Länge und von seinem Querschnitt, ermittelt worden, aber diese Abhängigkeit betrifft blos den absoluten Widerstand eines Leitungsdrahts und hat keine Beziehung auf den specifischen Widerstand des leitenden Metalls, über dessen Ursachen gar nichts bekannt ist. Diese Ursachen scheinen so tief in der Natur der Körper verborgen zu liegen, dass sie auf den bisherigen Wegen der Forschung unzugänglich sind. Kurz, die Frage nach den Ursachen des galvanischen Widerstands führt zu einem noch ganz unangebauten Gebiete der Wissenschaft. Ich werde mich daher nur auf eine einzelne Erörterung beschränken, nämlich darüber, in welcher Beziehung dieser Widerstand mit der Natur der elektrischen Fluida selbst, wie dieselben definirt worden sind, und mit deren Verhalten im elektrischen Doppelstrome stehe, wie dasselbe nach der gewöhnlichen Vorstellung auch hier immer angenommen und festgehalten worden ist.

Die Frage nach den Ursachen des Widerstands lässt sich zunächst specieller darauf richten, in wie weit diese Ursachen in dem ponderablen Träger des Stroms, und in wie weit dieselben in den darin enthaltenen elektrischen Fluidis liegen. Dass die Gegenwart der ponderablen Theile die Kanäle, durch welche die elektrischen Fluida strömen, mehr oder weniger beengen, und dadurch auf die elektrische Strömung Einfluss haben können, leuchtet von selbst ein; es fragt sich aber, ob diese Ursache zur Erklärung des Widerstands allein schon genüge. Diese Ursache des Widerstands würde blos die Masse des elektrischen Fluidums beschränken, welche an der Strömung Theil nehmen könnte. Es liegt aber in dem Wesen des Widerstands, wie wir ihn aus seinen Wirkungen kennen, dass durch die Grösse des Widerstands nicht blos die Masse des elektrischen Fluidums beschränkt wird, welche an der Strombewegung Theil nimmt, sondern, dass auch die Bewegung selbst beschränkt wird. Diese Beschränkung der Bewegung selbst kann aber ihren Grund in der blossen Gegenwart der ponderablen Theile nicht haben, sondern setzt nothwendig Kräfte voraus, welche den fortwirkenden elektromotorischen Kräften der Kette das Gleichgewicht halten, weil ohnedem jene Kräfte die elektrischen Fluida in ihrer Bewegung immerfort beschleunigen müssten, was bei einem gleichförmigen und beharrlichen Strome nicht der Fall ist.

Es fragt sich also ferner, woher die Kräfte rühren, welche bei einem gleichförmigen und beharrlichen Strome den fortwirkenden elek-

tromotorischen Kräften das Gleichgewicht halten und dadurch eine fernere Beschleunigung der elektrischen Fluida in ihrer Bewegung verhindern? Sind diese Kräfte rein elektrische Kräfte, oder sind es Kräfte, welche die ponderablen Theile auf die elektrischen Fluida, die an ihnen vorbeigehen, ausüben? Setzen wir in dem galvanischen Strome, wie wir es stets gethan haben, zwei elektrische Fluida voraus, die gleichzeitig durch denselben Leiter in entgegensetzten Richtungen strömen, so liegt es sehr nahe, eine Ursache des Widerstands für die Bewegung jedes Fluidums in dem ihm entgegenkommenden Fluidum zu suchen. Das positive und das negative Fluidum werden nämlich in dem Augenblicke der Begegnung sich zu neutralem Gemische verbinden, und so leicht auch diese neutrale Verbindung wieder zu scheiden sein möge, so wird doch eine solche neue Scheidung nur durch eine neue elektromotorische Kraft erfolgen können, und nicht in Folge einer Beharrung derjenigen Bewegungen, welche beide Fluida vor ihrer Vereinigung besassen, weil diese durch ihre Begegnung und Verbindung mit einander als aufgehoben betrachtet werden muss. Es geht daraus hervor, dass, während jedem Fluidum für sich bei seinen Bewegungen Beharrung zugeschrieben werden muss, beiden Fluidis zusammen bei ihrer Bewegung im Doppelstrome keine Beharrung zukommt. Wenn aber auch dieser Grund, warum den elektrischen Fluidis bei ihrer Bewegung im Doppelstrome keine Beharrung zukommt, der richtige ist, so gewinnt man doch dadurch noch keine deutliche Einsicht in den Hergang selbst, so lange die Kräfte unbekannt sind, welche die Verbindung und Vereinigung der elektrischen Fluida bei ihrer Begegnung bewirken, und welche bei ihrer wiederholten Scheidung überwunden werden müssen. Es fragt sich, ob dabei noch andere Kräfte in Betracht kommen, als diejenigen, welche durch das allgemeine elektrische Grundgesetz schon bestimmt sind, z. B. ob dabei besondere Molekularkräfte der elektrischen Fluida wirksam sind. Wäre dies nicht der Fall, so müsste der Hergang bei der abwechselnden Verbindung und Scheidung der elektrischen Fluida im Doppelstrome nach dem bekannten Grundgesetze der elektrischen Wirkung genauer bestimmt werden. Ohne eine solche genauere Bestimmung lässt sich im Allgemeinen nur mit einiger Wahrscheinlichkeit annehmen, dass die Intensität eines elektrischen Doppelstroms ausser von der Masse der elektrischen Fluida, welche an der Strömung Theil nimmt, von der Zahl der Scheidungen abhänge, welche in bestimmter Zeit erfolgen, und dass die Zahl dieser Scheidungen der während dieser Zeit fortwirkenden elektromotorischen Kraft proportional sein müsse. Ergäbe sich z. B., dass durch gleiche elektromotorische Kraft jedes elektrische Theilchen in gleicher Zeit immer eine gleiche Zahl Verbindungen und Scheidungen erlitte und dadurch eine gleiche Wegstrecke fortgeführt würde, so wäre die Stromgeschwindigkeit u für gleiche elektromotorische Kraft immer die nämliche, und es würde dann die Stromintensität

> für gleiche elektromotorische Kraft blos mit der Menge der Elektricität e variiren, welche auf einer solchen Wegstrecke (z. B. in der Längeneinheit des Leiters) enthalten wäre, und Zwar proportional damit sein, woraus hervorginge, dass der sogenannte Widerstand gleichfalls nur mit e variirte und zwar dem Werthe von e umgekehrt proportional wäre, welches derjenige Fall ist, welcher am Ende des vorigen Artikels als Erläuterung angeführt wurde.

Das heißt, nach Webers Auffassung hängt der Ursprung des Widerstands von Metallen mit dem Zusammentreffen positiver und negativer Ladungen zusammen, die sich innerhalb eines stromführenden Leiters in entgegengesetzte Richtungen bewegen.

4.3 Die molekularen Ströme nach Weber

In den Jahren 1839 und 1841 begann Weber mit einigen Experimenten, die mit der unipolaren Induktion zusammenhingen, ein Name, den er für einen Effekt prägte, der zuerst von Faraday 1831 beobachtet worden war. Bis zu diesem Zeitpunkt hatte Weber alle magnetischen Effekte gedeutet als bewirkt durch das Vorhandensein magnetischer Dipole (wobei angenommen wurde, dass ein Dipol aus zwei magnetischen Flüssigkeiten, einer Nord- und einer Südmagnetflüssigkeit besteht, beide durch eine kleine Distanz getrennt). In seinen Arbeiten von 1839 und 1841 begann er, sich der alternativen, in der Ampèreschen elektrodynamischen Theorie vertretenen Auffassung von den magnetischen Phänomenen zu nähern. Demnach betrachtete Weber anstelle eines magnetischen Dipols die mögliche Existenz von konstanten galvanischen Strömen innerhalb von Magneten. Während seiner ersten Arbeiten von 1839 und 1841 war Weber der Ansicht, dass das Phänomen der unipolaren Induktion nur unter der Annahme der Existenz magnetischer Flüssigkeiten erklärt werden könne, nicht aber auf der Basis der Hypothese von Ampère, der Existenz konstanter galvanischer Ströme im Innern der Magnete.[14] 1852 korrigierte Weber sich und zeigte, dass man auch auf der Basis der Hypothese von Ampère unipolare Induktionsphänomene erklären kann.[15] Auf jeden Fall, zumindest um 1839 herum, begann Weber ernsthaft damit, die Existenz der molekularen Ströme von Ampère in seine Überlegungen einzubeziehen.

In den Jahren 1848 und 1852 zeigte Weber, dass Faradays Entdeckung diamagnetischer Phänomene (1845) nur auf der Basis der molekularen Ströme von Ampère erklärt werden konnten, nicht aber unter der Annahme der Existenz magnetischer Flüssigkeiten.[16]

Im Abschnitt 4.2 wurde gezeigt, dass nach Webers Auffassung von 1852 der Ursprung des Widerstands von Metallen mit dem Zusammentreffen positiver

[14] [Web39, Webers *Werke*, Band 2, S. 171-175] und [Web41].
[15] [Web52a, Webers *Werke*, Band 3, S. 535-538].
[16] [Web48b, Webers *Werke*, Band 3, S. 264-268], [Web52a, Webers *Werke*, Band 3, S. 535-538] und [Web52c, Webers *Werke*, Band 3, S. 568-570].

und negativer Ladungen zusammenhängt, die sich in entgegengesetzten Richtungen innerhalb eines stromführenden Leiters bewegen. Sollte dies der Fall sein, so wäre dies nicht verträglich mit den molekularen Strömen von Ampère. Wenn die elektromotorische Kraft nach dem Ohmschen Gesetz verschwindet, verschwindet auch der elektrische Strom. Wie kann ein konstanter oder zeitlich andauernder molekularer Strom existieren, wie von Ampère vorgeschlagen, wenn dieser Strom aus positiven und negativen Ladungen zusammengesetzt ist, die auf kreisförmigen Bahnen um die Moleküle kreisen und daher einander begegnen? Sollte dies der Fall sein, so sollten diese molekularen Ströme einem Widerstand ausgesetzt sein. Dann wäre eine mikroskopische elektromotorische Kraft erforderlich, um diese molekularen Ströme mit konstanter Stromstärke aufrecht zu erhalten. Weber widerstrebte es, solche mikroskopischen Quellen elektromotorischer Kraft einzuführen. Andererseits wollte er Ampères Vorstellung von einem molekularen Strom aufrechterhalten, da er dieses Konzept für seine Theorien zum Magnetismus und Diamagnetismus benötigte. Somit stellte die Kombination des Ohmschen Gesetzes zusammen mit den Ampèreschen molekularen Strömen ein Problem für Weber dar. Im Jahr 1852 jedoch fand er eine faszinierende Lösung, um dieses Problem zu lösen. Hier folgen seine wesentlichen Argumente:[17]

> Sollte in der abwechselnden Verbindung und Scheidung der elektrischen Fluida bei ihrer Begegnung im Doppelstrome die Ursache des Widerstands wirklich enthalten sein, so würde daraus ferner die Unmöglichkeit eines *beharrlichen* Doppelstroms ohne fortwirkende äussere elektromotorische Kraft folgen, und es würde sich dann fragen, wie damit die Annahme von *beharrlichen Molekularströmen* zu Erklärung der magnetischen und diamagnetischen Erscheinungen verträglich wäre. Die Möglichkeit solcher Molekularströme müsste dann nothwendig auf einer Wirkung der ponderablen Molekule beruhen, durch welche die Bahnen der in entgegengesetzten Richtungen um jene Molekule sich bewegenden elektrischen Fluida von einander getrennt erhalten würden, indem z. B. das eine Fluidum eine engere Kreisbahn, das andere Fluidum eine weitere Kreisbahn um das Molekule beschriebe, sodass die beiden Fluida sich bei ihren Bewegungen nirgends begegnen und vereinigen könnten.

Das bedeutet, dass falls sich die geladenen Teilchen in Umlaufbahnen mit unterschiedlichen Radien bewegen, sie sich niemals treffen würden. Dann könnten sie ihre Umlaufbahnen ohne das Vorhandensein einer angelegten elektromotorischen Kraft fortsetzen. Schließlich würde kein Widerstand durch ihre Bewegungen in entgegengesetzte Richtungen entstehen, da sie einander niemals begegnen würden! Indem er dieser Idee einen Schritt weiter folgte, fasste Weber nun die Möglichkeit ins Auge, dass die positiven Ladungen mit den ponderablen Atomen des Metalls fest verbunden blieben. In einem ersten Modell wurden diese

[17] [Web52b, Webers *Werke*, Band 3, S. 403].

Atome als gleichmäßig auf einer geraden Linie verteilt betrachtet. Dabei kreisten um jedes dieser positiven Atome die negativen Ladungen auf kreisförmigen oder elliptischen Bahnen, wie die Planeten um die Sonne:[18]

> Zur Erläuterung des Hergangs bei der abwechselnden Verbindung und Scheidung der elektrischen Fluida im Doppelstrome, wie er aus dem Grundgesetze der elektrischen Wirkung ohne Zuziehung besonderer Molekularkräfte dieser Fluida abzuleiten wäre, diene folgende Betrachtung. In A, B, C .. seien positiv elektrische Massen, von denen zunächst angenommen werden möge, dass sie an den Orten, wo sie sich befinden, festgehalten würden. In a befinde sich gegenwärtig eine bewegliche negative elektrische Masse, auf welche die benachbarte positive Masse in A so stark wirke, dass dagegen die Wirkung der entfernten Massen in B, C .. vernachlässigt werden könne. Die Massen in A und a wirken auf einander mit einer Kraft, die von ihrer Grösse, Entfernung, relativen Geschwindigkeit und deren Aenderung abhängt; indess möge hier der Einfachheit wegen angenommen werden, dass die aus der relativen Geschwindigkeit und deren Aenderung sich ergebende Korrektion der elektrostatischen (von den Massen und der Entfernung abhängigen) Kraft gegen diese letztere so gering sei, dass sie ebenfalls vernachlässigt werden dürfte. Unter diesen Voraussetzungen folgt, dass, wenn keine andere Kraft auf die Masse in a wirkt, diese Masse den Gesetzen der Bewegung durch Centralkräfte, welche dem Quadrat der Entfernung verkehrt proportional sind, folgen müsse. Die Masse in a wird folglich nach den Kepler'schen Gesetzen z. B. eine elliptische Bahn um A beschreiben.

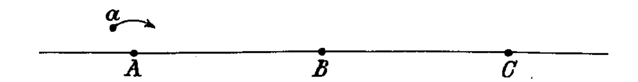


Abbildung 4.1: Webers Konzeption der Ampèreschen molekularen Ströme, [Web52b, Webers *Werke*, Band 3, S. 403]. Webers einfachstes Planetenmodell des Atoms. In dieser idealisierten Vorstellung bewegt sich ein negativ geladenes Teilchen a auf einer elliptischen Umlaufbahn um eine positive ponderable elektrische Masse A.

Diese Webersche Korpuskularvorstellung bezüglich des Ampèreschen molekularen Stroms kann als sein einfachstes Planetenmodell des Atoms betrachtet werden. Es stellt eine Transformation oder Modifikation des ursprünglichen Modells eines Ampèreschen molekularen Stroms dar. Eduard Riecke (1845-1915), Webers Nachfolger an der Universität Göttingen, erwähnte, dass Weber, indem er diesen Überlegungen folgte, Ampères Ringe, also dessen molekularen Ströme, in ein System elektrischer Satelliten auflöste.[19] Der Beginn der Überlegungen

[18] [Web52b, Webers *Werke*, Band 3, S. 403-404].
[19] [Rie92, S. 25].

zu dem Planetenmodell lässt sich in seiner grundlegenden Arbeit von 1852 genau zeitlich bestimmen: *Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere Widerstandsmessungen*.[20]

4.4 Weiterentwicklungen der Weberschen Konzeption bezüglich der molekularen Ströme von Ampère

Weber präsentierte im Jahr 1862 noch einmal ein Korpuskular- oder Planetenmodell zu den Ampèreschen molekularen Strömen. Der einzige Unterschied bezüglich seiner Arbeit von vor zehn Jahren bestand darin, dass er jetzt die Zeichen der stationären und beweglichen elektrischen Ladungen umkehrte. Das heißt, Weber nahm jetzt an, dass eine positive Ladung um ein ponderables negatives Molekül kreiste, allerdings blieb er für beide Möglichkeiten offen. Zu der Zeit Webers war es noch nicht möglich herauszufinden, welches Modell mit der Natur besser vereinbar ist. Weber präsentierte sein Modell wie folgt:[21]

> Denkt man sich dann also z. B. das negative Fluidum mit dem Molekule als fest verbunden, und das positive Fluidum allein in Molekularströmung begriffen, oder umgekehrt (eine Vorstellungsweise, welche sich dadurch empfiehlt, dass sie mit der Beharrung der Molekularströme ohne elektromotorische Kräfte bestehen kann), [...]

Im Jahr 1871 stellte er noch einmal dieses planetarische Modell des Ampèreschen molekularen Stroms vor und betonte seine Vorteile.[22] In dieser Arbeit stellte er Überlegungen zur Bewegung zweier elektrischer Teilchen an, wobei die Ladungen e und e' auf Grund seines Kraftgesetzes miteinander wechselwirken. Weber schrieb diesen geladenen Teilchen träge Massen ε und ε' zu, annehmend, dass diese Massen viel kleiner seien als die Massen der ponderablen Atome oder Moleküle. Er hatte bereits 1864 träge Massen für die elektrischen Flüssigkeiten eingeführt (siehe Abschnitt 6.2). Er erwog auch die Möglichkeit, dass jedes dieser elektrischen Teilchen an einem wägbaren Atom oder Molekül der Masse m haften könnte. Diese geladenen Atome oder Moleküle werden heutzutage als Ionen bezeichnet. In Bezug auf die Größenordnung von ε und m formulierte er den folgenden äußerst interessanten Kommentar:[23]

> In vielen Fällen ist die elektrische Masse ε an eine ponderable Masse m so gebunden, dass sie ohne dieselbe gar nicht bewegt werden kann, wo dann nur die Gesammtmasse $m + \varepsilon$ in Betracht kommt und ε gewöhnlich im Vergleich mit m als verschwindend betrachtet werden kann. Es kommen daher die Massen ε, ε' nur selten in Betracht.

[20] [Web52b].
[21] [Web62, Webers *Werke*, Band 4, S. 95].
[22] [Web71, Webers *Werke*, Band 4, S. 281-285] und [Web72, S. 132-136].
[23] [Web71, Webers *Werke*, Band 4, S. 251] und [Web72, S. 3].

Es ist erstaunlich, dass Weber bereits, ohne die Größenordnung von ε zu kennen, vermutete, dass diese viel kleiner sei als die Masse der ponderablen Teilchen. In diesem Artikel stellt er Überlegungen an zu der Bewegung zweier geladener Teilchen e und e', die auf Grund seines Kraftgesetzes miteinander wechselwirken. Wie üblich schrieb er diesen Teilchen träge Massen ε und ε' zu. Im Abschnitt 15 dieser Arbeit gab Weber diesen elektrischen Teilchen einen anderen Namen, nämlich *elektrische Atome*.[24] Er verfasste dann einen ähnlich lautenden Kommentar:

> Denn bei der allgemeinen Verbreitung der Elektricität darf angenommen werden, dass an jedem ponderablen Atome ein elektrisches Atom haftet. Haften aber elektrische Atome fest an ponderablen, so wird in den Verhältnissen der elektrischen Atome nichts geändert als die *Massen*, welche von den auf die elektrischen Atome wirkenden Kräften zu bewegen sind. Diese *Massen* sind aber in obiger Entwickelung umbestimmt gelassen und blos mit ε und ε' bezeichnet worden, während die elektrischen Theilchen selbst, denen die Massen ε und ε' angehören, unabhängig von der Kenntniss der Werthe ε und ε', durch die messbaren Grössen e und e' bestimmt worden sind. Nimmt man nun die Werthe von ε und ε' so gross, dass darin die Massen der an den elektrischen Atomen haftenden ponderablen Atome mit eingeschlossen sind, so finden alle zunächst blos für *elektrische Atome* gefundenen Bestimmungen auch auf die mit elektrischen verbundenen *ponderablen Atome* Anwendung.

Das heißt, in diesem Fall werden die Masse dieses geladenen ponderablen Atoms (heutzutage Ion genannt, mit einer Gesamtmasse $\varepsilon + m$ oder $\varepsilon' + m'$) ebenfalls durch ε oder durch ε' dargestellt.

Weber untersuchte die Bewegung zweier Ladungsträger entgegengesetzten Vorzeichens, die sich nach seinem fundamentalen Kraftgesetz relativ zueinander bewegten. Er zeigte, dass es eine Lösung für dieses Problem gibt, in dem diese geladenen Teilchen umeinander kreisen und dabei einen konstanten trennenden Abstand von einander einhalten. Er formulierte wie folgt in Abschnitt 17 dieser Arbeit, die einer Diskussion der Ampèreschen molekularen Ströme gewidmet war:[25]

> Das Verhältniss beider Theilchen in Beziehung auf Theilnahme an der Bewegung hängt von dem Verhältniss ihrer Masssen ε und ε' ab, wobei nach Art. 15 in den Werthen von ε und ε' die Massen der an den elektrischen Atomen haftenden ponderablen Atome mit eingeschlossen werden müssen. Es sei e das positive elektrische Theilchen; das negative sei demselben entgegensetzt gleich und werde daher mit $-e$ (statt mit e') bezeichnet. Nur an diesem letzteren hafte ein ponderables Atom, wodurch seine Masse so vergrössert werde, dass die

[24] [Web71, Webers *Werke*, Band 4, S. 279] und [Web72, S. 130].
[25] [Web71, Webers *Werke*, Band 4, S. 281] und [Web72, S. 132].

> Masse des positiven Theilchens dagegen als verschwindend betrachtet werden dürfte. Das Theilchen $-e$ wird dann als ruhend, und blos das Theilchen $+e$ als in Bewegung um das Theilchen $-e$ herum befindlich betrachtet werden können.

In der Schlussfolgerung dieses Abschnitts zeigte Weber, dass dieses Modell aus den folgenden zwei Hauptgründen vollständig mit den molekularen Strömen von Ampère verträglich war:[26]

> Man ersieht hieraus, dass ein elektrisches Theilchen $+e$, wenn es in Kreisbewegung um das elektrische Theilchen $-e$ sich befindet, auf alle galvanischen Ströme dieselben Wirkungen ausübt, welche Ampère von seinen Molekularströmen angenommen hat.
>
> Die von Ampère angenommenen Molekularströme unterscheiden sich aber von allen anderen galvanischen Strömen wesentlich dadurch, dass sie, nach Ampère's Annahme, ohne elektromotorische Kraft *beharren*, während alle anderen galvanischen Ströme, dem Ohm'schen Gesetze gemäss, der elektromotorischen Kraft proportional sind, also mit der elektromotorischen Kraft zugleich *verschwinden*. Es leuchtet nun aber ein, dass obiges elektrisches Theilchen $+e$ seine Kreisbewegung um das elektrische Theilchen $-e$, ohne elektromotorische Kraft, von selbst immer fortsetzt, und also auch in dieser Beziehung der Ampère'schen Annahme vom Molekularstrome ganz entspricht.
>
> Man erhält also auf diese Weise eine einfache Konstruktion der von Ampère, ohne Beweis von ihrer Möglichkeit, angenommen Molekularströme, begründet auf die Gesetze der *molekularen Aggregatzustandes zweier ungleichartigen elektrischen Theilchen*, wie sie im vorigen Artikel gefunden worden.

Alle diese Zitate zeigen deutlich, dass einer der Ursprünge von Webers Planetenmodell des Atoms mit seiner Auffassung über die Natur der molekularen Ströme von Ampère zusammenhing. Seine atomistische Sichtweise gab ihm den Schlüssel, ein planetares Modell zu entwerfen, in dem ein geladenes Teilchen um ein geladenes Teilchen mit entgegengesetztem Vorzeichen kreist. Da diese Ladungen während ihrer Bewegung einander nicht begegneten, ergab sich kein Widerstand, und diese Umlaufbahn würde unbegrenzt ohne die Anwesenheit einer elektromotorischen Kraft fortbestehen. Darüber hinaus konnte Weber mathematisch zeigen, dass sein Planetenmodell gemäß seinem eigenen Kraftgesetz zwischen Punktladungen die gleiche, auf einen externen galvanischen Strom einwirkende Kraft ergibt, wie die durch die Ampèreschen molekularen Ströme bewirkte Kraft, abgeleitet von dem Ampèresche Kraftgesetz zwischen Stromelementen.

Webers Ansichten bezüglich der Ampèreschen molekularen Ströme waren die Hauptinspiration, die zu seiner späteren Auffassung über die Natur des

[26][Web71, Webers *Werke*, Band 4, S. 285] und [Web72, S. 135-136].

elektrischen Stroms führte. Webers planetarisches Modell eines Ampèreschen molekularen Stroms löste das Problem seines zeitlich konstanten Zustandes ohne eine mikroskopische Quelle elektromotorischer Kraft annehmen zu müssen. Dieses planetarische Konzept beruhte auf der Vorstellung, dass ein Ladungsträger einer bestimmten Polarität mit dem schweren Molekül fest verbunden ist, während ein Ladungsträger der anderen Polarität vernachlässigbarer Masse um das Molekül kreist wie ein Planet um die Sonne. Die Beweise, die ihm zu diesem Zeitpunkt zur Verfügung standen, erlaubten ihm nicht zu entscheiden, ob dieser Fluss aus positiven oder negativen Ladungsträgern bestand. Aus diesem Grund ließ er diese Frage vorerst offen für beide Möglichkeiten.

Kapitel 5

Die Entwicklung der Weberschen Auffassung vom elektrischen Strom: Vom Doppelstrom zum einfachen Strom

Im Jahr 1846 hatte Weber einen doppelten Strom, bestehend aus positiven und negativen Ladungsträgern angenommen, die sich relativ zum Draht mit gleichen, aber entgegengesetzt gerichteten Geschwindigkeiten bewegen (siehe Abschnitt 3.5). Etliche Jahre später, und zwar im Jahr 1852 verwendete er ein anderes Modell für die Deutung des elektrischen Stromes und zwar nahm er nun an, daß die positiven Ladungen mit den ponderablen Atomen des Metalls fest verbunden seien. In einem ersten Ansatz wurden diese Atome als gleichförmig verteilt entlang einer geraden Linie angenommen. Dabei kreisten die negativen Ladungsträger um jedes dieser positiven Atome in kreisförmigen oder elliptischen Bahnen, ähnlich wie die Planeten um die Sonne. Betrachtet man einen spezifischen negativen Ladungsträger, der um ein erstes, im Gitter des Metalls fixiertes positives Atom kreist, so wird dieser beim Anlegen einer Spannung oder elektromotorischen Kraft anfangen, sich auf spiralförmigen Bahnen mit anwachsendem Radius um dieses erste Atom herum zu kreisen. Schließlich würde es in die Einflusssphäre eines anderen positiven Atoms kommen und beginnen, um dieses herum zu kreisen. Sofern die angelegte elektromotorische Kraft für längere Zeit angelegt wird, wird dieser negative Ladungsträger weitere Spiralbewegungen um dieses zweite positive Atom ausführen, bis er in die Einflusssphäre eines dritten positiven Atoms kommt, um das herum er dann zu kreisen beginnt. Diese Bewegung würde sich kontinuierlich fortsetzen und im Mittel eine gleichförmige Bewegung der negativen Ladungsträger entlang der Richtung des Leiters er-

zeugen. Nach Weber hat der Widerstand der Metalle seinen Ursprung in den zentripetalen Kräften, die von den positiven Ladungen ausgehen. Sobald die elektromotorische Kraft aufhört, werden die negativen Ladungsträger das letzte positive Atom umkreisen, um das herum sie sich vorher bewegten. Webers Beschreibung lautet folgendermaßen:[1]

> Es wird aber eine Störung in dieser Bewegung der betrachteten Masse um A eintreten, sobald ausser der Centralkraft eine elektromotorische Kraft parallel mit der Linie AB mit konstanter Intensität auf die betrachtete Masse wirkt. Die Elemente der bisherigen elliptischen Bewegung werden nun fortwährend geändert werden, und die von der betrachteten Masse beschriebene Bahn wird dadurch in eine Spirallinie übergehen, in welcher die betrachtete Masse endlich so weit von A fortgeführt wird, dass sie aus der Wirkungssphäre von A in die Wirkungssphäre von B gelangt, und so fort, nachdem sie eine Anzahl Spiralwindungen um B beschrieben hat, auch von B so weit fortgeführt wird, dass sie aus der Wirkungssphäre von B in die Wirkungssphäre von C gelangt. Auf diese Weise kann also eine elektromotorische Kraft ein Fortströmen der negativen Elektricität in der Richtung ABC bewirken, an welchem die positiven Massen in A, B, C keinen Antheil nehmen. Das Wesentliche dieser Betrachtung besteht darin, dass, sobald die elektromotorische Kraft zu wirken aufhört, die betrachtete Masse sogleich wieder nach den Kepler'schen Gesetzen in elliptischer Bahn um diejenige positive Masse sich bewegen wird, in deren Nähe sie sich gerade befindet, weil nach Wegfall der störenden Kraft keine weitere Aenderung der Elemente ihrer Centralbewegung Statt findet. Auch ersieht man leicht, dass in dieser wesentlichen Beziehung nichts geändert werden würde, wenn die positiven Massen in A, B, C ... gleichfalls beweglich angenommen und ausser der Centralkraft der negativen Massen, in deren Nähe sie sich befinden, der störenden Einwirkung der nämlichen elektromotorischen Kraft unterworfen würden, welche aber für diese positive Massen die entgegengesetzte Richtung, wie für die negative hätte. Es ergiebt sich daraus folgendes Resultat. Wenn die elektromotorische Kraft c auf die betrachtete negative Masse allein wirkte, so würde sie dieser Masse in der Richtung ABC während der Zeit t eine Geschwindigkeit ct ertheilen, mit welcher sich diese Masse, auch nachdem die Kraft c zu wirken aufgehört hätte, beharrlich in der Richtung ABC fortbewegen müsste. Unter Mitwirkung der Centralkräfte der positiven Massen in A, B, C . . aber wird zwar die elektromotorische Kraft c ebenfalls, so lange sie wirkt, ein Fortrücken der betrachteten Masse in der Richtung ABC bewirken, sobald die Kraft c aber zu wirken aufhört, wird auch dieses Fortrücken aufhören, d. h. dieses Fortrücken der betrachteten Masse in der Richtung ABC geschieht dann nicht mit einer Geschwindigkeit, welche fortdauert,

[1] [Web52b, Webers *Werke*, Band 3, S. 404-405].

> nachdem die Kraft zu wirken aufgehört, welche das Fortrücken hervorgebracht hat. Der Grund also, warum die betrachtete Masse in der Richtung ABC nicht weiter fortrückt, nachdem die elektromotorische Kraft zu wirken aufgehört hat, liegt darnach in den von den positiven Massen auf die betrachtete negative Masse ausgeübten Centralkräften. Das Wort *Widerstand* bezeichnet aber in der Theorie der galvanischen Kette wesentlich nichts Anderes, als das Faktum, dass die Fortbewegung der elektrischen Fluida im galvanischen Strome der elektromotorischen Kraft proportional ist, d. h. aufhört, sobald die elektromotorische Kraft zu wirken aufhört. Es folgt also daraus, dass der Grund des Widerstands in den *Centralkräften* liegen kann, welche die im elektrischen Doppelstrome sich begegnenden positiven und negativen Massen wechselseitig auf einander ausüben. Es würde für weitere theoretische Untersuchung wichtig sein, aus diesen Grunde eine bestimmte und präcise Definition des Widerstands abzuleiten und die Beziehungen zu entwickeln, in welchen der nach seiner Wirkung definirte Widerstand dazu stehe. Es würde dabei hauptsächlich auf eine Bestimmung der Zeit ankommen, welche ein Theilchen braucht, um in seiner Spiralbahn von einer Windung um eine Centralmasse A zur entsprechenden Windung um die darauf folgende Centralmasse B zu gelangen. Dass aber solche Bestimmungen, auch wenn alle wesentlichen Elemente für die Rechnung gegeben sind, grosse Schwierigkeiten finden, zeigt die Theorie der Störungen in der Astronomie.

Webers Idee, dass die Widerstandskraft auf eine Newtonsche Zentralkraft proportional zu $1/r^2$ zurückgeführt werden könnte, scheint im wesentlichen aus zwei Gründen nicht möglich zu sein:[2] (1) Die Newtonschen Kräfte sind konservativ und (2) hängen nicht von den Geschwindigkeiten der interagierenden Körper ab. Die Widerstandskraft, die für das Ohmsche Gesetz verantwortlich ist, ist nicht konservativ und ist proportional zu den Driftgeschwindigkeiten der beweglichen Ladungen, gegen deren Bewegung diese Kraft wirkt.[3] Daher muss der Ursprung der Widerstandskraft woanders gesucht werden. Dies ist ein sehr schwieriges Thema in der Physik, und bis heute gibt es auf diese Frage keine klare Antwort.

Zum damaligen Zeitpunkt war es Weber noch nicht klar, was mit der zusätzlichen kinetischen Energie geschieht, die die mobilen Ladungsträger während ihrer Übertragung zwischen benachbarten stationären Massen aufgrund der angelegten externen elektromotorischen Kraft erhalten. Im Kapitel 7 wird gezeigt, dass Weber im Jahr 1878 eine mögliche Lösung für dieses Problem fand.

Die Vorstellung von einer Doppelströmung wurde anfangs von Ørsted, von Ampère und ebenfalls von Weber im Jahr 1846 und danach in der Zeit von 1855 bis 1857 vertreten. Aber von diesem Zeitpunkt an vertrat Weber die Idee

[2] [AH07, Appendix A: Wilhelm Weber and Surface Charges, S. 195-211] und [AH13, Anhang A: Wilhelm Weber und Oberflächenladungen, S. 175-194].

[3] [Ass97].

einer einfachen Strömung, und er hielt an dieser Idee bis zum Ende seines Lebens fest, wie aus einer Veröffentlichung 1871,[4] einer weiteren Arbeit von 1875, *Ueber die Bewegung der Elektricität in Körpern von molekularer Konstitution*,[5] sowie aus seinen posthum veröffentlichten Arbeiten zu ersehen ist, *Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere über den Zusammenhang des elektrischen Grundgesetzes mit dem Gravitationsgesetze*.[6] Hier einige Zitate aus seiner letzten Arbeit:[7]

> Es ist interessant, diesen Entwickelungsgang der physikalischen Forschungen weiter zu verfolgen und zwar, indem man beachtet:
>
> *Erstens*, dass die *Lehre vom Magnetismus* von der Elektricitätslehre nur absobirt werden kann unter Voraussetzung *beweglicher Theile im Innern* aller magnetischen und magnetisirbaren Körper, nämlich *positiv elektrischer* Moleküle, welche *Molekularströme* um die ponderabelen, mit *negativer* Elektricität geladenen Moleküle im Innern aller magnetisirbaren Körper bilden.
>
> *Zweitens*, indem man ferner beachtet, dass die *Lehre vom Galvanismus und der Wärme*, um gleichfalls von der Elektricitätslehre absorbirt zu werden, im Innern aller galvanischen Leiter und Wärmeleiter ebenfalls beweglich Theile als vorhanden voraussetzen müssen; dass es aber keineswegs *andere Theile* zu sein brauchen, deren Bewegung im *Innern ponderabeler Körper* den *Magnetismus*, *andere*, deren Bewegung den *Galvanismus* und noch andere, deren Bewegung die *Wärme* erzeuge, sondern dass *dieselben Theile* nach Verschiedenheit ihrer Bewegungen *Magnetismus*, *Galvanismus* und *Wärme*, bald zusammen, bald einzeln erzeugen können, und dass diese beweglichen Theile im Innern der ponderabelen Körper *Moleküle der einen Elektricität* seien, welche die *positive Elektricität* genannt werden soll.
>
> *Drittens* ist dabei zu beachten, dass die Bewegungen dieser positiv elektrischen Moleküle um die negativ elektrisch geladenen *ponderabelen Moleküle* der Körper *entweder* geschlossene Kreisbahnen bilden, oder von Kreisbahnen wenig abweichende Spiralbahnen mit *periodisch* bald wachsendem bald abnehmendem Halbmesser, *oder* endlich spiralförmige Bahnen mit *fortgesetzt wachsendem* Halbmesser, wodurch sie endlich in *Wurfbewegung* übergehen und der Uebergang dieser elektrischen Moleküle von *einem ponderabelen Moleküle* zu einem *anderem benachbarten ponderabelen Moleküle* bewirkt wird, worauf theils die *Wärmeleitung*, theils die Bildung *galvanischer Ströme* in metallischen Leitern beruht.
>
> *Viertens* endlich ist auch noch zu beachten, dass durch *magnetische oder elektrodynamische Induktion von Aussen her* Kreisströme um

[4] [Web71, Webers *Werke*, Band 4, Abschnitte 17-19, S. 281-294] und [Web72, S. 132-144].
[5] [Web75, Webers *Werke*, Band 4, S. 340-342].
[6] [Web94a, Webers *Werke*, Band 4, S. 479-480 und 499] und [Web08, S. 2-3 und 28].
[7] [Web94a, Webers *Werke*, Band 4, S. 479-480] und [Web08, S. 2-3].

die *ponderabelen Moleküle* eines Körpers erregt, oder schon vorhandene Kreisströme *verstärkt*, *geschwächt* oder *anders gerichtet* werden können.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich Weber ab 1852 von der Vorstellung eines doppelten galvanischen Stromes löste und von da ab annahm, dass ein elektrischer Strom aus dem Fluss von Ladungen einer einzelnen Polarität besteht

Im nächsten Kapitel wird ein weiterer Ausgangspunkt beschrieben, von dem aus Weber zu seinem Planetenmodells des Atoms gelangte. Diese Überlegungen stehen in einem direkten Zusammenhang mit dem von ihm 1846 vorgeschlagenen grundlegenden Kraftgesetz.

Kapitel 6

Zur Bewegung zweier geladener Teilchen gemäß dem Weberschen Kraftgesetz

6.1 Die Webersche Kraft und potentielle Energie

Im Jahr 1846 erschien die von Weber verfasste Arbeit *Elektrodynamische Maassbestimmungen — Über ein allgemeines Grundgesetz der elektrischen Wirkung.*[1] In dieser Arbeit stellte er sein fundamentales Kraftgesetz vor, das die Wechselwirkung zwischen zwei geladenen Teilchen beschreibt und zur Grundlage all seiner nachfolgenden Arbeiten zur Elektrodynamik wurde. Diese Wechselwirkung hängt nicht nur vom Abstand der beiden wechselwirkenden Ladungsträger ab, sondern auch von ihrer relativen Radialgeschwindigkeit und ihrer relativen Radialbeschleunigung. Er leitete es von der zwischen zwei Stromelementen wirkenden Ampèreschen Kraft ab, die in seiner endgültigen Form von Ampère im Jahr 1822 veröffentlicht wurde.[2] In einem Stromelement ids wird die Stromstärke durch i und die infinitesimale Länge des Elements durch ds gekennzeichnet. Die Kräfte von Ampère und Weber, sowie die Gravitationskraft von Newton (1687) und die elektrostatische Kraft von Coulomb (1785) sind Fernwirkungskräfte.

Im Jahr 1846 stellte Weber[3] das folgenden Gesetz auf, das die Kraft zwischen zwei Ladungsträgern e und e' beschreibt, die durch eine Distanz r voneinander getrennt sind und sich relativ zueinander mit einer Relativgeschwindigkeit dr/dt

[1] [Web46] und [Web07].
[2] [Amp22b].
[3] [Web46, Webers *Werke*, Band 3, S. 157] und [Web07, S. 98].

und relativer Radialbeschleunigung d^2r/dt^2 bewegen.

$$\frac{ee'}{r^2}\left(1-\frac{a^2}{16}\frac{dr^2}{dt^2}+\frac{a^2}{8}r\frac{d^2r}{dt^2}\right) \ . \tag{6.1}$$

1852 ersetzte er die Konstante $a^2/16$ durch $1/c^2$. Damit lautete sein Kraftgesetz wie folgt:[4]

$$\frac{ee'}{r^2}\left(1-\frac{1}{c^2}\frac{dr^2}{dt^2}+\frac{2r}{c^2}\frac{d^2r}{dt^2}\right) \ . \tag{6.2}$$

Webers Konstante c ist nicht dasselbe wie die moderne Lichtgeschwindigkeit im Vakuum (die hier durch $c_L = 2.998 \times 10^8$ m/s wiedergegeben wird), sondern ist gleich diesem Wert multipliziert mit $\sqrt{2}$ und somit gleich $c = \sqrt{2}c_L = 4.24 \times 10^8$ m/s. Die Webersche Konstante c wurde zuerst von Weber und R. Kohlrausch in den Jahren 1855-1856 gemessen. Als Endergebnis[5] erhielten sie $c = 4.39 \times 10^8$ m/s.

Es gibt viele moderne Arbeiten, in denen die Webersche Konstante, das Kraftgesetz von Weber,[6] die Lichtgeschwindigkeit und die Wellentheorie des Lichts behandelt werden.[7]

1848 zeigte Weber, dass sein Kraftgesetz von einer geschwindigkeitsabhängigen potentiellen Energie abgeleitet werden kann.[8] Im Jahr 1871 fand er[9] den folgenden Ausdruck für sein Potential:[10]

$$V = \frac{ee'}{r}\left(1-\frac{1}{c^2}\frac{dr^2}{dt^2}\right) \ . \tag{6.5}$$

Die durch Gleichung (6.2) gegebene Kraft kann von V durch $-dV/dr$ erhalten werden.

---

[4][Web52b, Webers *Werke*, Band 3, S. 366].

[5][Web55, Webers *Werke*, Band 3, S. 594], [WK56, Webers *Werke*, Band 3, S. 605], [KW57, Webers *Werke*, Band 3, S. 652] und [WK68].

[6]In Vektornotation und dem Internationalen Einheitensystem *SI* lässt sich die Webersche Kraft $\vec{F}$, die durch die Ladung e auf die Ladung e' ausgeübt wird, folgendermaßen darstellen:

$$\vec{F} = \frac{ee'}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\hat{r}}{r^2}\left(1-\frac{\dot{r}^2}{c^2}+\frac{2r\ddot{r}}{c^2}\right) = \frac{ee'}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\hat{r}}{r^2}\left(1-\frac{\dot{r}^2}{2c_L^2}+\frac{r\ddot{r}}{c_L^2}\right) \ . \tag{6.3}$$

Für diese Gleichung ist $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ $C^2N^{-1}m^{-2}$ die Permittivität des leeren Raums, ist $\hat{r}$ der Einheitsvektor in der Richtung von e nach e', ist $\dot{r} \equiv dr/dt$ die relative radiale Geschwindigkeit, $\ddot{r} \equiv d^2r/dt^2$ die relative radiale Beschleunigung und $c_L = c/\sqrt{2} = 2.998 \times 10^8$ m/s entspricht der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum.

[7][Wie60, S. 107-113], [Wie67, S. 138-141], [Wie93], [Wie94], [Ass94], [Ass99, Abschnitt 11.2, S. 244-249], [ARW02], [ARW04], [Wie04], [AH07, Sektion 1.4, S. 14-20] und [AH13, Sektion 1.4, S. 17-25].

[8][Web48a, Webers *Werke*, Band 3, S. 245].

[9][Web71, Webers *Werke*, Band 4, Abschnitt 4, S. 257 und Abschnitt 5, S. 259, Fußnote 1] und [Web72, Abschnitt 4, S. 10 und Abschnitt 5, S. 11, Fußnote].

[10]In *SI* Einheiten lautet Webers Potentielle Energie folgendermaßen:

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{ee'}{r}\left(1-\frac{\dot{r}^2}{c^2}\right) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{ee'}{r}\left(1-\frac{\dot{r}^2}{2c_L^2}\right) \ . \tag{6.4}$$

6.2 Webers Einführung einer trägen Masse für elektrische Flüssigkeiten

In einer im Jahr 1864 veröffentlichten Arbeit führte Weber die träge Masse eines geladenen Teilchens explizit ein:[11]

> Nach unserer bisherigen Kenntniss muss zwar der Elektricität als einem Körper eine *Masse* zugeschrieben werden, und diese Masse übt auf eine andere ähnliche Masse eine *Kraft* aus; es fehlt aber noch an der Kenntniss des *Verhältnisses* jener Masse zu dieser Kraft. Die Kenntniss dieses *Verhältnisses* war nun auch nicht nöthig, so lange es sich um *Gleichgewichtserscheinungen* oder um *beharrliche Bewegungen* handelte, wo die Kenntniss der *Kräfte* genügte; die verschiedenen Elektricitätsmengen konnten dabei, statt nach ihren Massen, nach der Grösse der *Kräfte* unterschieden werden, die sie auf eine und dieselbe Elektricitätsmenge in der Einheit der Entfernung ausübten, und diese letztere Elektricitätsmenge konnte durch die *Kraft* bestimmt werden, die sie auf eine *gleiche* Elektricitätsmenge in der Einheit der Entfernung ausübte. Eine so bestimmte Elektricitätsmenge war nun wirklich die sogenannte *elektrostatische Maasseinheit*. Handelt es sich aber nicht um blosses *Gleichgewicht* oder um blosse *Erhaltung einer schon vorhandenen Bewegung*, sondern soll einer Elektricitätsmenge *neue Bewegung* ertheilt werden, welche sie vorher nicht besass, so reicht die blosse Kenntniss der Kräfte nicht aus, sondern es bedarf auch der Kenntniss der *Masse* der in Bewegung zu setzenden Elektricität, oder des *Verhältnisses* dieser Masse zu der von ihr auf die elektrostatische Maasseinheit in der Einheit der Entfernung ausgeübten Kraft, d. i. der Kenntniss der *Zahl der elektrostatischen Maasseinheiten, welche auf die Masseneinheit* (Milligramm) *Elektricität gehen.*

In Webers sechster großer Abhandlung, die 1871 veröffentlicht wurde,[12] behandelte er die Bewegung zweier Teilchen mit den Ladungen e und e', die nach seinem Kraftgesetz, Gleichung (6.2), miteinander wechselwirken. Die träge Massen der Teilchen wurden durch ε und ε' gekennzeichnet. In diesem Fall verwendete er ein System von Einheiten, für die die Masseneinheit ein Milligramm ist.[13] Für positive Ladungen kennzeichnete Weber das Verhältnis Ladung zu Masse mit dem Symbol $a > 0$, nämlich $e/\varepsilon = e'/\varepsilon' = a$, während er für negative Ladungen das Verhältnis Ladung zu Masse mit dem Symbol $b < 0$ kennzeichnete, nämlich $e/\varepsilon = e'/\varepsilon' = b$. Diese Konstante $a = e/\varepsilon = e'/\varepsilon'$ ist nicht mit der Konstante a von Gleichung (6.1) zu verwechseln. Soweit bekannt war Weber der erste Wissenschaftler, der explizit einem geladenen Teilchen eine träge Masse zuwies. Dabei war er der Auffassung, dass nur das Experiment über das

[11] [Web64, Webers *Werke*, Band 4, S. 181].
[12] [Web71].
[13] [Web71, Webers *Werke*, Band 4, S. 250-251] und [Web72, S. 2-3].

Verhältnis von a^2 zu b^2 entscheiden könne. Da die Frage nach dem Wert dieses Verhältnisses zu Webers Lebzeiten noch nicht geklärt war, überließ er dies der zukünftigen Entwicklung. Dies war eine erstaunliche Erkenntnis, die sich in der Zukunft als äußerst wertvoll erweisen sollte. Zum Beispiel ist heute bekannt, dass es Protonen und Elektronen gibt, die die gleiche Ladung (gleicher absoluter Werte), aber unterschiedliche Massen aufweisen. In der Sprache Webers wäre das Verhältnis a^2/b^2 von 1 verschieden, wenn der Wert von a für ein Proton und der Wert von b für ein Elektron eingesetzt wird.

Diesbezüglich äußerte sich Weber folgendermaßen:[14]

> 1. *Elektrische Theilchen und elektrische Massen.*
>
> Man bezeichnet Theilchen des positiven und des negativen elektrischen Fluidums mit denselben Buchstaben, z. B. mit e oder e' u. s. w., legt aber e oder e' ... einen positiven oder negativen Werth bei, jenachdem das Theilchen dem positiven oder negativen Fluidum angehört.
>
> [...] Bezeichnet man nämlich die *Massen der Theilchen* e, e' (im Sinne der Mechanik, wonach die *Masseneinheit* [Milligramm] durch die Masse *eines* ponderablen Körpers gegeben ist, und *verschiedene* Massen untereinander verglichen werden, nach Proportion der reciproken Beschleunigungen, die ihnen von gleicher Kraft ertheilt werden) mit ε, ε', die stets positive Werthe haben, so ergiebt sich für *positive* Werthe von e, e',
>
> $$\frac{e}{\varepsilon} = \frac{e'}{\varepsilon'} = a \ ;$$
>
> für *negative* Werthe von e, e'
>
> $$\frac{e}{\varepsilon} = \frac{e'}{\varepsilon'} = b \ ,$$
>
> wo a einen bestimmten *positiven*, b einen bestimmten *negativen* Werth hat. Ob hierin $a^2 = b^2$ sei, oder in welchem Verhältnisse a^2 zu b^2 stehe, ist bisher ebensowenig ermittelt worden, wie der Zahlenwerth von a oder b selbst.

6.3 Webers Bewegungsgleichung und die daraus sich ergebende kritische Distanz

Um die Bewegung zweier geladener Teilchen zu untersuchen, die nach seinem Kraftgesetz aufeinander einwirken, betrachtete Weber getrennte Situationen. In der ersten Situation bewegen sich die Ladungen nur entlang der sie verbindenden

[14] [Web71, Webers *Werke*, Band 4, S. 249-251] und [Web72, S. 2-3].

Geraden. In der zweiten Situation ließ er Bewegungskomponenten im rechten Winkel zu der sie verbindenden Geraden zu, so dass die Teilchen Bahnen umeinander herum ausführen können. Zunächst einige Betrachtungen zur ersten Situation.[15]

Bei der Verwendung des Weberschen Kraftgesetzes bleibt die Energie erhalten, wie Weber selbst gezeigt hat. Dies bedeutet, dass die Summe der potentiellen und kinetischen Energie beiden Teilchen zeitlich konstant ist, sofern sie nicht mit anderen Körpern interagieren. Weber definierte r_0 als Abstand zwischen den Ladungen, wenn ihre relative Radialgeschwindigkeit gegen Null geht, das heißt, wenn $dr/dt = 0$. Weber schrieb:[16]

> r_0 bezeichnet den Wert von r für den Moment, wenn $dr/dt = u = 0$.

Weber definierte außerdem[17] eine kritische Distanz ρ folgendermaßen:[18]

$$\rho \equiv 2\left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon'}\right)\frac{ee'}{c^2} \ . \tag{6.7}$$

Diese kritische Distanz wurde von Weber in seiner Arbeit von 1871 als „Molekularentfernung“ bezeichnet.[19] Zwar konnte Weber den genauen Wert dieser Konstante noch nicht bestimmen, wusste jedoch, dass dieser Wert extrem klein sein würde, und nannte ihn deshalb „Molekularentfernung“. Später verwendete er[20] die Bezeichnung „kritische Entfernung“. Weber verwendete[21] die Bezeichnung „Molekularbewegungen“ für den Fall, dass der Abstand r zwischen den sich bewegenden Teilchen kleiner ist als ρ und verwendete die Bezeichnung „Fernbewegungen“ für Bewegungen mit $r > \rho$. Er zeigte, dass kein Übergang von Fernbewegungen zu Molekularbewegungen stattfinden konnte, solange sich beide Teilchen nur aufgrund ihrer Wechselwirkung bewegten. Das heißt, sofern die Bewegung bei $r < \rho$ begonnen hat, würde sie immer innerhalb dieser kritischen Distanz bleiben. Würden sie andererseits bei $r > \rho$ beginnen, würde sie immer außerhalb dieser Entfernung bleiben. Diese molekulare oder kritische Distanz ρ kann einen positiven oder negativen Wert haben, abhängig vom Vorzeichen des Produkts ee'.

Mit diesen Definitionen von r_0 und ρ, und unter Anwendung der Energieerhaltung, erhielt Weber die folgende Bewegungsgleichung für die Wechselwirkung

---

[15] Für eine vollständige Lösung dieses Problems im Internationalen Einheitensystem, siehe [AC92].

[16] [Web71, Webers *Werke*, Band 4, S. 269] und [Web72, S. 120].

[17] [Web71, Webers *Werke*, Band 4, S. 269] und [Web72, S. 120].

[18] Im *SI* System lautet die Definition von ρ wie folgt:

$$\rho \equiv \frac{ee'}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon'}\right)\frac{2}{c^2} = \frac{ee'}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\varepsilon + \varepsilon'}{\varepsilon\varepsilon'}\frac{1}{c_L^2} \ . \tag{6.6}$$

[19] [Web71, Webers *Werke*, Band 4, S. 298] und [Web72, S. 148]. Eine Diskussion und Hinweise zu diesem Konzept findet sich in [Wie60, S. 140, 211, 212, 217 und 226], [AC92] und [AW03].

[20] [Web94a, Webers *Werke*, Band 4, S. 492].

[21] [Web71, Webers *Werke*, Band 4, S. 268, 270 und 271] und [Web72, S. 119 und 121].

zweier geladener Teilchen, die sich entlang der sie verbindenden Geraden bewegen:[22]

$$\frac{dr^2}{dt^2} = \frac{r - r_0}{r - \rho}\frac{\rho}{r_0}c^2 \ . \tag{6.13}$$

Im folgenden Teil seiner Arbeit stellte Weber Überlegungen zu der oben schon erwähnten zweiten Situation an, in der nun die Teilchen auch Bewegungskomponenten senkrecht zu ihrer Verbindungslinie aufweisen können. Somit können sie jetzt umeinander kreisen.[23] Für diese zweite Situation erhielt Weber analoge Resultate wie die vorherigen, diesmal jedoch mit Bewegungen in einem zwei- oder dreidimensionalen Raum und nicht länger eingeschränkt auf eine gerade Linie. Für diesen allgemeineren Fall erhielt Weber[24] die folgende Bewegungsgleichung:[25]

---

[22]Die folgende Ableitung dieser Gleichung erfolgt im IS Einheitensystem. Betrachtet werden zwei Teilchen auf der x Achse, die sich längs ihrer geraden Verbindungslinie bewegen. In Übereinstimmung mit dem Satz von der Erhaltung der Energie gilt: Die Summe der Weberschen potentiellen Energie V und der kinetischen Energie T bezogen auf zwei auf Grund der Weberschen Kraft wechselwirkenden Teilchen ist zeitlich konstant. Die Ladungen dieser beiden Teilchen werden mit e und e', deren träge Massen mit ε bzw. ε', gekennzeichnet. Das Gesetz von der Erhaltung der Energie lautet somit:

$$V + T = V_0 + T_0 \ , \tag{6.8}$$

wobei V_0 und T_0 die Anfangswert von V und T sind. Die Entfernungen der Ladungen e und e' zum Nullpunkt des Koordinatensystems werden mit r_1 bzw. r_2 gekennzeichnet. Daraus ergibt sich als Abstand r zwischen diesen beiden auf der x Achse befindlichen Teilchen $r = r_1 + r_2$. Für die radiale Geschwindigkeit $dr/dt = \dot{r}$ zwischen diesen beiden Teilchen ergibt sich $\dot{r} = \dot{r}_1 + \dot{r}_2$. Bezogen auf ein Inertialsystem, in dem der Massenmittelpunkt der beiden Teilchen mit dem Nullpunkt dieses Systems übereinstimmt, ergibt sich $\varepsilon r_1 = \varepsilon' r_2$, oder $r_1 = (\varepsilon'/\varepsilon)r_2$ und $\dot{r}_1 = (\varepsilon'/\varepsilon)\dot{r}_2$. Daraus folgt

$$\dot{r} = \dot{r}_1 + \dot{r}_2 = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon}\dot{r}_2 + \dot{r}_2 = \frac{\varepsilon + \varepsilon'}{\varepsilon}\dot{r}_2 = \frac{\varepsilon + \varepsilon'}{\varepsilon'}\dot{r}_1 \ . \tag{6.9}$$

Aus dieser Gleichung ergibt sich die kinetische Energie dieser beiden Teilchen, die sich längs ihrer Verbindungslinie bewegen, wie folgt

$$T = \frac{\varepsilon}{2}\dot{r}_1^2 + \frac{\varepsilon'}{2}\dot{r}_2^2 = \frac{\varepsilon}{2}\left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon + \varepsilon'}\right)^2\dot{r}^2 + \frac{\varepsilon'}{2}\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon + \varepsilon'}\right)^2\dot{r}^2 = \frac{\varepsilon\varepsilon'}{\varepsilon + \varepsilon'}\frac{\dot{r}^2}{2} \ . \tag{6.10}$$

Aus der Einsetzung von Gleichungen (6.4) und (6.10) in Gleichung (6.8) folgt:

$$\frac{ee'}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{r}\left(1 - \frac{\dot{r}^2}{2c_L^2}\right) + \frac{\varepsilon\varepsilon'}{\varepsilon + \varepsilon'}\frac{\dot{r}^2}{2} = \frac{ee'}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{r_0} \ . \tag{6.11}$$

Die Konstante r_0 war von Weber definiert worden als der Wert von r für welchen $\dot{r} = 0$ gilt.

Verwendet man Webers kritische Distanz ρ aus Gleichung (6.6), so kann diese letztere Gleichung (6.11) folgendermaßen umgeformt werden:

$$\dot{r}^2 = \frac{r - r_0}{r - \rho}\frac{\rho}{r_0}c^2 = \frac{r - r_0}{r - \rho}\frac{\rho}{r_0}2c_L^2 \ . \tag{6.12}$$

Gleichung (6.12) ist äquivalent zu Gleichung (6.13).

[23]Eine vollständige analytische Lösung dieses Problems unter Verwendung elliptischer Funktionen existiert bereits, [CA91].

[24][Web71, Webers *Werke*, Band 4, S. 272-274] und [Web72, S. 123-125].

[25]In SI Einheiten ergibt sich folgende Gleichung:

$$\frac{u^2}{c^2} = \frac{r - r_0}{r - \rho} \left(\frac{\rho}{r_0} + \frac{r + r_0}{r} \frac{\alpha_0^2}{c^2} \right) , \tag{6.15}$$

wobei Weber $u = dr/dt$ setzte und die Größe α wie folgt definierte:[26]

> Bezeichnet α den Unterschied der Geschwindigkeiten, welche zwei elektrische Theilchen e und e', bei der Entfernung r von einander, im Raume in einer Richtung senkrecht auf die sie verbindende Gerade r besitzen, [...]

Das heißt, α ist die Tangentialgeschwindigkeit eines Teilchens relativ zu dem anderen, und α_0 ist die relative Tangentialgeschwindigkeit für $r = r_0$ und $dr/dt = 0$.

6.4 Bewegung zweier gleichartiger elektrischer Teilchen

Weber betrachtete zunächst die Situation, in der die beiden wechselwirkenden Teilchen Ladungen derselben Polarität aufweisen und sich nur entlang der sie verbindenden Geraden bewegen. Bemerkenswert an der Weberschen Elektrodynamik ist, dass nach Gleichung (6.13) und (6.12) zwei Teilchen mit Ladungen des gleichen Vorzeichens einander anziehen können, falls sie molekulare Bewegungen ausführen, das heißt, sofern $0 \leq r < \rho$. Wenn sich zwei gleichpolig geladene Teilchen in Abständen r größer als ρ relativ zueinander bewegen, stoßen sie sich gegenseitig ab. Dies trennt ihre Bewegung[27] in zwei „Aggregatzustände“. Im ersten Aggregatzustand befinden sie sich immer in molekularer Bewegung, sich gegenseitig anziehend und zwischen $r = 0$ und $r = r_0 < \rho$ oszillierend. Die relative Geschwindigkeit dr/dt bei $r = r_0$ ist gleich Null, während sie bei $r = 0$ den Wert $\pm c = \pm\sqrt{2}c_L$ annimmt. Hier gilt das untere Zeichen unmittelbar vor ihrem Zusammentreffen und das obere Zeichen unmittelbar danach. Im zweiten Aggregatzustand stoßen sie sich gegenseitig ab, bleiben aber immer in einer Entfernung von $r > \rho > 0$. Sofern sie sich ursprünglich voneinander entfernen, werden sie diese Bewegung für immer beibehalten, bis sie sich in unendlicher Entfernung voneinander befinden und werden nicht wieder zurückkommen. Wenn sie sich anfänglich einander annähern, erreichen sie eine kleinste Distanz von $r_0 > \rho$ für die $dr/dt = 0$ gilt. Nach dieser Begegnung mit kleinstem Abstand werden sie sich aufgrund ihrer beständigen Abstoßung voneinander entfernen, bis sie einen unendlichen Abstand von einander erreicht haben und werden nicht wieder zurückkommen.

$$\frac{\dot{r}^2}{c^2} = \frac{\dot{r}^2}{2c_L^2} = \frac{r - r_0}{r - \rho} \left(\frac{\rho}{r_0} + \frac{r + r_0}{r} \frac{\alpha_0^2}{c^2} \right) = \frac{r - r_0}{r - \rho} \left(\frac{\rho}{r_0} + \frac{r + r_0}{r} \frac{\alpha_0^2}{2c_L^2} \right) . \tag{6.14}$$

[26] [Web71, Webers *Werke*, Band 4, S. 272] und [Web72, S. 123].

[27] [Web71, Webers *Werke*, Band 4, S. 271] und [Web72, S. 122].

Weber dachte dann über die zweite Situation nach, in der er Bewegungen der Teilchen mit Komponenten im rechten Winkel zu der sie verbindenden Geraden zuließ. Das heißt, die Teilchen konnten sich jetzt auf geschlossenen Bahnen umeinander herum bewegen. Für den Fall zweier Teilchen mit Ladungen gleichen Vorzeichens gäbe es wieder zwei Aggregatzustände. Im ersten Aggregatzustand würden sie sich anziehen, falls sie sich innerhalb eines kugelförmigen Raums mit dem Durchmesser ρ bewegen, also molekulare Bewegungen ausführen. Im zweiten Aggregatzustand würden sie sich bei einer gegenseitigen Entfernung von $r > \rho$ abstoßen. Dieses letztere Ergebnis ist demjenigen ähnlich, welches man erhält, wenn man auf der Basis des Coulombschen Gesetzes die hyperbelförmige Bahn zweier sich abstoßender geladener Teilchen bestimmt, die sich nach Erreichen einer nächsten Annäherung mit kleinster Entfernung unendlich weit voneinander entfernen.[28] Weber beschrieb diese beiden Aggregatzustände wie folgt, (unsere Kommentare in den Fußnoten):[29]

> Es ergiebt sich nämlich auch hier für zwei *gleichartige* Theilchen[30] wieder die Unterscheidung derselben zwei Aggregatzustände, nämlich eines Aggregatzustands, in welchem die beiden Theilchen Bewegungen machen mit periodischer Wiederkehr derselben Lage gegen einander,[31] und eines Aggregatzustands, in welchem die beiden Theilchen Bewegungen machen, durch welche sie von einander immer weiter entfernt werden und niemals zu derselben Lage zurückkehren.[32] Einen Uebergang von dem einen Aggregatzustand zu dem anderen giebt es nicht, so lange als beide Theilchen sich nur unter dem Einflusse ihrer eigenen Wechselwirkung bewegen.

Die bemerkenswerte Tatsache, dass zwei Ladungen des gleichen Zeichens einander anziehen, wenn sie sehr nahe beieinander sind (wenn gilt: r unterhalb der kritische Entfernung ρ) ist ein einzigartiges Merkmal des elektrodynamischen Kraftgesetzes von Weber. Diese Tatsache wird eine wichtige Rolle in seinem vollentwickelten Planeten-Modell des Atoms spielen, welches im Kapitel 10 diskutiert wird.

6.5 Bewegung zweier ungleichartigen elektrischer Teilchen

Weber analysierte nicht explizit die Bewegung zweier Teilchen mit verschiedenpoliger Ladung, die sich entlang der sie verbindenden Geraden bewegen. Auf jeden Fall kann diese Lösung[33] aus der Bewegungsgleichung, die er erhalten

[28] [Sym71, Abschnitt 3.16].
[29] [Web71, Webers *Werke*, Band 4, S. 274] und [Web72, S. 125].
[30] Das heißt, mit Ladungen gleichen Vorzeichens.
[31] In molekularer Bewegung mit $r < \rho$.
[32] In diesem zweiten Fall einer Agggregatzustand bewegen sich die Teilchen in einer gegenseitigen Entfernung $r > \rho$.
[33] Siehe [AC92].

hat, Gleichung (6.13), abgeleitet werden. Bei Ladungen mit unterschiedlichem Vorzeichen ist die kritische Distanz ρ negativ. Daher würden sie sich immer anziehen.

Für den Fall von zwei Ladungen mit entgegengesetztem Vorzeichen, die sich entlang der sie verbindenden Geraden bewegen, gibt es eine Lösung, bei der die Teichen zwischen $r = 0$ und $r = r_0$ oszillieren, wobei r_0 die Größe ihrer Entfernung r ist mit $dr/dt = 0$. Dies ist in etwa analog zum Coulomb-Fall, mit dem Unterschied, dass die relative Geschwindigkeit bei $r = 0$ den Wert $\pm c = \pm\sqrt{2}c_L$ annimmt, anstelle des Coulomb-Wertes $\dot{r} \to \pm\infty$ bei $r \to 0$.

Es gibt eine andere Lösung für dieses Problem, bei der die beiden Ladungen bei $r = 0$ mit einer relativen Geschwindigkeit $\dot{r} = -c = -\sqrt{2}c_L$ kollidieren und sich nach dieser größten Annäherung voneinander entfernen. Sie würden nie wieder zusammentreffen. Wenn sie sich in einer unendlichen Entfernung voneinander befinden, werden sie sich weiterhin mit einer endlichen relativen Geschwindigkeit voneinander entfernen. Dies ist analog zur Coulomb-Lösung, mit Ausnahme der endlichen Geschwindigkeit während der Kollision.

Weber dachte explizit über die Bewegung zweier ungleichartiger elektrischer Teilchen nach (das heißt, es gilt $ee' < 0$), die sich im rechten Winkel zu der sie verbindenden Geraden bewegen.[34] Für zwei Teilchen mit Ladungen entgegengesetzten Vorzeichens gab es eine besondere Lösung, die dem Newtonschen oder Coulombschen Fall entsprach. Das heißt, es ergibt sich eine Rotation der zwei Partikel umeinander, während sie während dieser Rotation in einem konstanten Abstand zueinander bleiben. Diese Art der Lösung einer Kreisbahn war für zwei Ladungen derselben Polarität nicht möglich, so fern sie gemäß dem Weberschen Gesetz miteinander wechselwirken.

Sofern sich jedoch die Entfernung r zwischen den sich umkreisenden Teilchen entgegengesetzter Polarität während ihrer Bewegung änderte, fand Weber eine Lösung, ausgehend von seinem Kraftgesetz, in der die Abstände zwischen den beiden Teilchen immer zwischen zwei begrenzenden Radien beschränkt bleiben, und für die gilt: $dr/dt = 0$. In einer Arbeit von 1875 kennzeichnete er[35] diese beiden begrenzenden Radien mit r_0 und r^0, mit $r^0 \geq r_0$. Dies ist in etwa den Newtonschen oder Coulombschen Lösungen einer Keplerschen elliptischen Umlaufbahn ähnlich, in der die beiden Körper zwischen dem kleinsten Abstand r_0 und dem größten Abstand r^0 oszillieren, während sie umeinander kreisen. Weber schrieb hierzu:[36]

> beide Theilchen immer in *schwingender Bewegung gegen einander innerhalb der angegeben Grenzen* bleiben müssen.

Aufgrund des Weberschen fundamentalen Kraftgesetzes würde sich jedoch nicht mehr die exakte Coulomb- oder Newton-Lösung einer geschlossenen elliptischen Keplerbahn ergeben. Aufgrund des Gesetzes von Weber würde in diesem Fall die Ellipsenachse präzedieren, während die Teilchen sich zwischen den begrenzenden Radien umkreisen.

---

[34] [Web71, Webers *Werke*, Band 4, Abschnitt 16, S. 279-281] und [Web72, S. 130-132].

[35] [Web75, Webers *Werke*, Band 4, S. 341].

[36] [Web71, Webers *Werke*, Band 4, S. 281] und [Web72, S. 132].

Es gibt viele Arbeiten, in denen unter Anwendung des Weberschen Gesetzes auf Elektromagnetismus und Gravitation die Präzession des Perihel mathematisch behandelt wird.[37]

Diese Aggregatzustände von zwei Ladungen mit demselben Vorzeichen oder mit entgegengesetztem Vorzeichen sind dem Atommodell von Rutherford und Bohr sehr ähnlich, welches erst 40 Jahre später entwickelt wurde.

[37] [See] mit deutscher Übersetzung in [See24], [Tis72], [Zol76, S. xi-xii], [Zol83, S. 126-128], [Ser], [Tis95], [Ger98], [Ger17], [Sch25], [Nor65, S. 46], [Whi73, S. 207-208], [Eby77], [Ass89], [CA91], [Ass94, Abschnitte 7.1 und 7.5], [Ass99] usw.

Kapitel 7

Webers Vermutungen über die elektrische Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit von Leitern

Im vorliegenden Kapitel werden Webers Vermutungen bezüglich der Wärmeleitung und der Leitung der Elektrizität in metallischen Leitern vorgestellt.[1]

Seit Beginn des 19. Jahrhunderts war bekannt, dass ein metallischer Leiter erhitzt wird, wenn in ihm ein elektrischer Strom fließt. Um die Mitte des XIX. Jahrhunderts wurde die Vorstellung akzeptiert (die bereits vor der Mitte des Jahrhunderts diskutiert worden war), dass Wärme mit der Bewegung von kleinen Teilchen in einem Körper verbunden ist, anstatt als eine materielle Substanz betrachtet zu werden, wie der sogenannte Wärmestoff. Zu der Zeit Webers war bekannt, dass Wärme mit der inneren kinetischen Energie des Körpers, das heißt mit Bewegung zusammenhängt. Eine höhere Temperatur eines Körpers bedeutet, dass er eine größere innere kinetische Energie hat, statistisch verteilt auf seine Bestandteile. Unter diesem Gesichtspunkt ist Wärmeübertragung nichts anderes als die Übertragung von Bewegung oder von kinetischer Energie. Aber zu diesem Zeitpunkt war die Frage, was in einem Körper in Bewegung ist, noch nicht vollständig geklärt: war es die wägbare Materie (die Moleküle, die den Körper bilden), der darin enthaltene Äther (manchmal Wärmemedium genannt), oder waren es die elektrischen Teilchen, die den Körper bilden. Es war ebenfalls noch nicht klar, welche Art von Bewegung mit Wärme in Zusammenhang stand. Es konnte zum Beispiel eine oszillierende Bewegung oder eine Rotationsbewegung sein.

Das Gesetz bezüglich der Erzeugung von Wärme durch elektrischen Strom

[1] [Wie60, S. 182-197], [Wie67, S. 157-161 und S. 169-177], [Wie88] und [Wie07].

wurde von J. P. Joule (1818-1889), A. E. Becquerel[2] (1820-1891) und H. F. E. Lenz (1804-1865) in den 1840er Jahren entdeckt. Joule stellte zunächst experimentell fest, dass die in einer gegebenen Zeit erzeugte Wärme proportional zum Quadrat des Stroms, zum Widerstand des Leiters und zur Zeitdauer ist, während der konstante Strom durch den Leiter fließt.

Weber wollte sowohl die Existenz von permanenten molekularen Strömen und auch die Erzeugung von Wärme in Leitern auf der Grundlage eines einzigen Prinzips erklären, nämlich der Bewegung geladener Teilchen. Auf der Basis einer mechanischen Theorie der Wärme konnte angenommen werden, dass die Wärme mit der Bewegung kleiner Teilchen im Körper zusammenhängt. Die Umwandlung von elektrischer Energie in Wärme deutete auf eine enge Verbindung zwischen dieser Bewegung und der Bewegung der elektrischen Teilchen hin, die den Strom bilden. Diese Möglichkeit wurde auch nahe gelegt durch die Entdeckung, dass ein guter Wärmeleiter auch ein guter Stromleiter ist. Die Gesetze zur thermischen und zur elektrischen Leitfähigkeit von Metallen und ihre Zusammenhänge mit der Temperatur wurden von G. Wiedemann (1826-1899), R. Franz (1827-1902) und L. Lorenz (1829-1891) in den 1850er- und 1870er-Jahren aufgestellt.

Weber legte seine diesbezüglichen Ideen erstmals 1862 in einer in Zusammenhang mit der Galvanometrie stehenden Arbeit vor.[3] Er erweiterte seine Analyse in einer Arbeit im Jahr 1875 über die Bewegung von Elektrizität in Körpern von molekularer Konstitution.[4] Im Kapitel 5 wurde gezeigt, dass Weber 1852 begonnen hatte, den molekularen Strom von Ampère als eine positive Ladung zu betrachten, die um einen stationären negativen Ladungsträger in einer keplerschen elliptischen Umlaufbahn kreist (die Ladungspolaritäten könnten nach Weber auch umgekehrt werden). In den Jahren 1862 und 1875 erwog er die Möglichkeit, dass diese stationäre negative Ladung mit dem ponderablen Molekül des Leiters verschmolzen ist. In Bezug auf den galvanischen Strom hielt Weber es für möglich, dass durch die Einwirkung einer externen elektromotorischen Kraft diese elliptische Bahn in eine spiralförmige umgewandeln wird. Die bewegliche Ladung würde dann eine bestimmte stationäre Ladung mit zunehmendem Radius umkreisen, bis sie in den Einflussbereich einer anderen stationären Ladung entlang der Richtung der elektromotorischen Kraft gerät und anfängt, um diese herum zu kreisen. Dieser Vorgang würde sich fortgesetzen, solange die elektromotorische Kraft aktiv ist. Um die Umwandlung von elektrischer Energie in thermische Energie erklären zu können, schlussfolgerte Weber in seiner Arbeit von 1875, dass die bewegliche Ladung aufgrund der angelegten elektromotorischen Kraft bei der zweiten stationären Ladung mit einer höheren translationale kinetische Energie angekommen sein müßte, als beim Verlassen der ersten stationären Ladung entlang der Leiterrichtung. Es müsste dann bei diesem Übergang diese zusätzliche translationale kinetische Energie an diese nächste stationäre Ladung abgegeben werden. Daraus ergibt sich, dass sich die bewegliche Ladung im Durchschnitt entlang der Richtung der angelegten elektromotorischen Kraft

[2]Vater von Henri Becquerel (1852-1908), einem der Entdecker der Radioaktivität.

[3][Web62, Webers *Werke*, Band 4, Abschnitt 33, S. 91-96].

[4][Web75, Webers *Werke*, Band 4, Abschnitte 4 bis 9, S. 334-353].

mit einer konstanten Geschwindigkeit bewegt. Die abgegebene translationale kinetische Energie der mobilen Ladung wäre somit in thermische Energie des Moleküls umgewandelt worden. Weiterhin erwog er in der gleichen Arbeit von 1875 die Möglichkeit, dass diese abgegebene translationale kinetische Energie durch das um das Molekül kreisende Teilchen aufgenommen wird. Die abgegebene translationale kinetische Energie wäre somit in eine rotationale kinetische Energie des umlaufenden Teilchens umgewandelt worden. Und diese größere orbitale oder translationale kinetische Energie wäre äquivalent zu einer größeren thermischen Energie des Körpers. Mit anderen Worten, die Erwärmung eines metallischen Leiters aufgrund des Stromflusses wäre gleichbedeutend mit einer schnelleren Rotationsbewegung der geladenen Teilchen, welche die Ampèreschen Molkularströme bilden.

In dieser Arbeit hat Weber die Möglichkeit nicht in Betracht gezogen, dass die höhere Temperatur eines Körpers mit einer Schwingung der ponderablen Atome oder Moleküle als Ganzes verbunden sein könnte. Er sah nicht die Möglichkeit, dass Wärme mit einer zufälligen Bewegung der wägbaren Moleküle in Verbindung gebracht werden könnte, d.h. unabhängig von der zufälligen Bewegung der elektrisch geladenen Teilchen des Körpers.

Im Folgenden seien einige spezifische Beispiele seiner Überlegungen wiedergegeben. In Abschnitt 4 seines Artikels von 1875 erwog Weber die Möglichkeit, dass drei Phänomene mit inneren Bewegungen eines Körpers in Verbindung stehen könnten, nämlich galvanische Ströme, magnetische Phänomene und Wärme, und weiterhin, dass all diese Phänomene mit inneren Bewegungen derselben Korpuskeln, nämlich geladenen Teilchen, zusammenhängen könnten. Dabei könnten galvanische und elektrodynamische Phänomene auf die Translationsbewegungen dieser geladenen Teilchen zurückzuführen sein. In Bezug auf magnetische und diamagnetische Phänomene nahm er an, dass sie auf die Rotationsbewegungen dieser geladenen Teilchen um die ponderablen Teilchen des Körpers zurückzuführen sein könnten, etwa wie eine planetarische Ampèrsche Molekularströmung. Schließlich brachte er in dieser Arbeit auch die Wärme mit der Rotationsbewegung dieser geladenen Teilchen um die ponderablen Teilchen des Körpers in einen Zusammenhang.

Im nächsten Abschnitt seiner Arbeit stellte Weber Überlegungen an zu einer Identität zwischen der durch die elektromotorische Kraft erzeugten kinetischen Energie und der im Leiter durch den galvanischen Strom erzeugten Wärme. Falls ein Leiter keinen Widerstand hätte, würde die Anwendung einer externen elektromotorischen Kraft die translationale kinetische Energie der mobilen Ladungen unbegrenzt erhöhen. Aber dies geschieht nach dem Ohmschen Gesetz nicht in einem mit Widerstand behafteten Leiter. Da der Strom für eine konstante angelegte elektromotorische Kraft konstant bleibt, bedeutet dies, dass die translatorische kinetische Energie der beweglichen Teilchen im Durchschnitt nicht zunimmt, während sie sich trotz der Anwendung der elektromotorischen Kraft entlang des Leiters mit Widerstand bewegen. Webers Schlussfolgerung war, dass in Übereinstimmung mit der Erhaltung der Energie die von der externen elektromotorischen Kraft erzeugte Arbeit in eine andere Art von Bewegung umgewandelt werden muss. Er erwähnt dann, dass bei magnetischen

und diamagnetischen Phänomenen angenommen werden könnte, dass die elektrischen Teilchen um die ponderablen Moleküle des Leiters kreisen. Er kehrte dann noch einmal zu seinem Modell von 1852 zurück, in dem er diese planetarische Ampèresche Molekularströmung und eine Anordnung von ponderablen Molekülen A, B, C in einer geraden Linie betrachtete und annahm, dass die positiven elektrischen Teilchen sich um ein mit einer negativen Ladung verbundenes, ponderables Molekül herum bewegten.[5] Unter der Einwirkung einer externen elektromotorischen Kraft würde das positiv geladene Teilchen in Richtung dieser Kraft beschleunigt werden, während es um ein negatives ponderables Molekül kreist. Seine Umlaufbahn würde dann spiralförmig, bis es in den Einflussbereich des nächsten negativen ponderablen Moleküls B gelangt und anfängt, es zu umkreisen. Beim Erreichen dieses zweiten ponderablen Moleküls hätte es eine höhere translationale Bewegungsenergie als diejenige, die es beim Verlassen des ersten ponderablen Moleküls A besaß. Es würde diese zusätzliche translationale kinetische Energie an dieses ponderable Molekül abgeben, und hätte dann beim Verlassen von B die gleiche translationale kinetischen Energie, die es beim Umkreisen von A hatte. Dieser Vorgang würde sich bei den Molekülen C, D usw. wiederholen. Das Neue in dieser Arbeit von 1875 besteht darin, dass er die Möglichkeit in Betracht zog, dass diese zusätzliche translationale kinetische Energie, die das geladene Teilchen bei B verliert, in eine rotierende kinetische Energie anderer geladener Teilchen umgewandelt werden könnte, die um Molekül B kreisen und seine magnetischen und diamagnetischen Phänomene bedingen. Dieselbe Übertragung oder Umwandlung von Energie würde sich bei C, D usw. ereignen. Und diese größere Rotationsenergie der geladenen Teilchen, die um B, C, D usw. kreisen, würde die thermische kinetische Energie darstellen. Das heißt, der Temperaturanstieg würde in diesem Weberschen Modell einem Anstieg der kinetischen Rotationsenergie der geladenen Teilchen entsprechen, die um die ponderablen Moleküle des Körpers kreisen.

Weber sprach von einer ballistischen Flugbahn oder Wurfbewegung, wenn ein positives elektrisches Teilchen sich einem negativen, wägbaren Molekül, das es umkreist, verlässt, und aufgrund der angelegten externen elektromotorischen Kraft zu einem anderen negativen ponderablen Molekül beschleunigt wird. Er sprach auch von einer durchschnittlichen Entfernung zwischen den Molekülen, einem mittlerer Molekularabstand.[6]

Im Folgenden werden einige von Webers eigenen Worten wiedergegeben, mit denen er eine Verbindung zwischen Wärme und der kinetische Energie seiner planetaren molekularen Ströme beschreibt:[7]

> Dieses Wachstum der *Bewegungsenergie* der in einem Konduktor enthaltenen elektrischen Theilchen, während ein Strom durch den Konduktor geht, ergiebt sich also als eine nothwendige Folge von der Einwirkung der elektromotorischen Kraft auf die Theilchen, während diese Theilchen in Folge des Stroms in der Richtung dieser Kraft

[5] [Web75, Webers *Werke*, Band 4, S. 348].
[6] [Web75, Webers *Werke*, Band 4, S. 349].
[7] [Web71, Webers *Werke*, Band 4, S. 292-294] und [Web72, S. 143-144].

> fortrücken.
>
> Diese theoretische Folgerung wird nun durch die Erfahrung zwar nicht auf direktem, aber doch auf indirektem Wege bestätigt, nämlich dadurch, dass ein Wachsthum der *Wärmeenergie* im Konduktor, während ein Strom durch den Konduktor geht, *beobachtet* wird. Und dieses *beobachtete* Wachsthum der *Wärmeenergie* im Konduktor ist jenem *berechneten* Wachsthum der *Bewegungsenergie* der elektrischen Theilchen in den Ampère'schen Molekularströmen des Konduktors *gleich*.
>
> Nun ist die *Wärmeenergie* eines Körpers eine *Bewegungsenergie*, welche von Bewegungen *im Innern des Körpers* herrührt, die sich der direkten Beobachtung entziehen. Ebenso ist die den elektrischen Theilchen der Ampère'schen Molekularströme in einem Konduktor angehörige *Bewegungsenergie* eine Bewegunsenergie, welche von Bewegungen im *Innern des Konduktors* herrührt, die sich der direkten Beobachtung entziehen.
>
> [...]
>
> Es ergiebt sich hieraus also die Folgerung, dass, wenn in den Konduktoren alle elektrischen Theilchen im Aggregazustande Ampère'scher Molekularströme sich befinden, das beobachtete Wachsthum der *Wärmeenergie* eines Konduktors, während ein Strom durch ihn hindurchgeht, *unmittelbar* von dem Wachsthume der *Bewegungsenergie* der elektrischen Theilchen, welche die Ampère'schen Ströme bilden, herrührt, d. h. dass die dem Konduktor durch den Strom ertheilte *Wärmeenergie* eine *Bewegunsenergie* ist, welche von Bewegungen im Innern des Konduktors herrührt, und zwar von Bewegungen, *die in einer Verstärkung der von den elektrischen Theilchen im Konduktor gebildeten* Ampère'*schen Molekularströme besteht.*

Viele Wissenschaftler anerkannten die Rolle von Wilhelm Weber als Initiator der modernen Theorie der elektrischen Leitung in Metallen.[8] Um ein Beispiel zu geben, folgen hier die Worte von Drude, die ursprünglich im Jahr 1905 veröffentlicht wurden:[9]

> Die Vermutung, dass die elektrische Leitung in Metallen im wesentlichen die gleiche ist wie in Elektrolyten, das heißt, dass sie durch die Bewegung kleiner geladener Teilchen bewirkt wird, wurde zuerst von W. Weber gemacht[10] der diese Erkenntnis nutzte, um daraus das Ohmsche Gesetz abzuleiten.[11]

[8] [Wie07].

[9] [Dru05, S. 253].

[10] [Anmerkung von Drude, bezugnehmend auf [Web62, Webers *Werke*, Band 4, S. 91], [Web71], [Web75] und [Web94a]:] W. Weber. “Gesammelte Werke,” 4, p. 91, 1862; p. 247, 1871; p. 312, 1875; p. 479.

[11] Übersetzung: H. H.

Kapitel 8

Webers Vermutungen über die Wärmeleitung in Isolatoren

In seinem Artikel aus dem Jahr 1875 versuchte Weber, eine Erklärung für den Unterschied zwischen einem Leiter und einem Isolator zu entwickeln.[1] Beide leiten Wärme, aber nur ersterer leitet Strom. Weber hatte die Umwandlung von elektrischer Energie in thermische Energie in Leitern unter der Annahme erklärt, dass die zusätzliche translatorische kinetische Energie der beweglichen geladenen Teilchen, die einen galvanischen Strom bilden, in eine Rotationsenergie der beweglichen geladenen Teilchen umgewandelt wird, die um die ponderablen Moleküle des Leiters kreisen. Diese zusätzliche translatorische kinetische Energie würde durch jedes bewegliche geladene Teilchen aufgrund der angelegten elektromotorischen Kraft gewonnen werden, und zwar während dieses bewegliche geladene Teilchen von der Umkreisung eines entgegengesetzt geladenes Moleküls in Richtung der angelegten elektromotorischen Kraft auf die Umlaufbahn um ein anderes entgegengesetzt geladenes Molekül übertragen wird. Weber kennzeichnete diese Art der Wärmeausbreitung in metallischen Leitern als *Wärmeverbreitung durch Emission* oder einfach als *Wärmeleitung*.[2]

Aber wie könnte er die Wärmeleitung oder Wärmeübertragung in Isolatoren erklären, oder die Wärmeausbreitung durch den leeren Raum? Durch diese Materialien können keine elektrischen Ströme fließen. In diesen Fällen sprach er von einer zweiten Art der Wärmeausbreitung, die er als *Wärmeverbreitung durch Strahlung* kennzeichnete oder einfach als *Wärmestrahlung*.[3]

Wie in Kapitel 6 gezeigt wurde, fand Weber eine Lösung für zwei Ladungsträger entgegengesetzter Polarität, die sich unter der Wirkung der Weberschen Kraft umkreisen und deren gegenseitiger Abstand zwischen den beiden Grenz-

[1] [Web75, Webers *Werke*, Band 4, Abschnitte 6 und 7, S. 339-343].
[2] [Web75, Webers *Werke*, Band 4, S. 343].
[3] [Web75, Webers *Werke*, Band 4, S. 343].

werten r_0 und r^0, mit $r^0 \geq r_0$, oszilliert. Nur in einem sehr speziellen Fall würden diese beiden Radien miteinander übereinstimmen, was zu geschlossenen kreisförmigen Umlaufbahnen führen würde. Die Werte dieser beiden begrenzenden Radien sollten von den intrinsischen Eigenschaften des atomaren Paares abhängen, nämlich von ihren elektrischen Ladungen e und e' und ihren trägen Massen ε und ε'. Die Werte für diese beiden Radien sollten auch von dem anfänglichen trennenden Abstand zwischen den beiden das atomare Paar bildenden Ladungsträgern abhängen, von ihren Anfangsgeschwindigkeiten in Richtung ihrer Verbindungslinie sowie von ihren Anfangsgeschwindigkeiten senkrecht zu dieser Richtung. In seiner Arbeit von 1875 folgte Weber seinen früheren Arbeiten von 1852 und 1871, in denen er einen Ampèreschen Molekularstrom vermutete, bei dem das positive Teilchen wie ein Planet ein negatives, mit einem ponderablen Molekül verbundene Teilchen umkreist. Die Masse des positiven Teilchens wurde dabei als vernachlässigbar angesehen im Vergleich mit der gemeinsamen Masse des negativen Ladungsträgers und dem damit verbundenen ponderablen Molekül. Ein Isolator, so vermutete Weber, könnte aus einer Anordnung von ponderablen Molekülen bestehen, die von Ampèreschen Molekularströmen planetenhaft umgeben sind.

In Abhängigkeit von diesen Eigenschaften war Weber in der Lage, zwischen zwei Klassen von Körpern zu unterscheiden, die er Leiter und Isolatoren nannte.[4] Nach Weber sei r^0 die größte Entfernung zwischen einem positiven Teilchen und einem negativen Teilchen, wobei das positive Teilchen um das negative Teilchen kreist. Da die Masse des negativen Moleküls viel größer als die des positiven Teilchens angenommen wurde, kann das negative Molekül als ruhend betrachtet werden. Nach Weber wären Leiter jene Körper, für die r^0 so groß ist, dass sie die Einflusssphäre eines benachbarten negativen Moleküls erreichen können. In diesem Fall wäre die Übertragung des positiven Teilchens aus dem Einflussbereich des ersten negativen Teilchens auf den des zweiten negativen Teilchens möglich. Isolatoren hingegen wären jene Körper, für die der größte Abstand r^0 nicht groß genug ist, um in den Einflussbereich irgendeines benachbarten Moleküls zu gelangen. Folglich wäre es nicht möglich, eine positive Ladung, die ein negatives Molekül umkreist, auf irgend ein anderes negatives Molekül zu übertragen, auch wenn eine externe elektromotorische Kraft angelegt wird. Weber formulierte diese Unterscheidung mathematisch.

Um die Wärmeleitung in Isolatoren und durch den Raum zu erklären, zog Weber die Existenz eines feinen Mediums in Erwägung, welches sich zwischen den Molekülen eines Leiters und ebenfalls im Raum befindet. Er nannte dieses feine Medium *Wärmeäther* oder *Lichtäther*.[5] Von diesem Äther hat Weber immer angenommen, dass er eine korpuskulare oder körnige Struktur hat. Außerdem betrachtete er ihn als aus positiven und negativen elektrischen Teilchen zusammengesetzt. In seiner Arbeit von 1846 machte er zum Beispiel die folgenden Anmerkungen:[6]

[4][Web75, Webers *Werke*, Band 4, S. 341].
[5][Web62, Webers *Werke*, Band 4, S. 94-96].
[6][Web46, Webers *Werke*, Band 3, S. 213-214] und [Web07, S. 141-142].

> Die *Idee von der Existenz* eines solchen vermittelnden Mediums findet sich schon in der *Idee des überall verbreiteten elektrischen neutralen Fluidums* vor, und wenn sich auch dieses *neutrale Fluidum*, ausser den Konduktoren, den bisherigen Beobachtungen der Physiker fast gänzlich entzogen hat; so ist jetzt doch Hoffnung, dass es gelingen werde, über dieses allgemein verbreitete Fluidum auf mehreren neuen Wegen näheren Aufschluss zu gewinnen. Vielleicht kommen in anderen Körpern, ausser den Konduktoren, keine Strömungen, sondern nur *Schwingungen* vor, die man erst künftig mit den Art. 16 erörterten Mitteln genauer wird beobachten können. Ferner brauche ich nur an Faraday's neueste Entdeckung des Einflusses *elektrischer Strömungen auf Lichtschwingungen* zu erinnern, welche es nicht unwahrscheinlich macht, dass das überall verbreitete elektrische neutrale Medium selbst derjenige überall verbreitete Aether sei, welcher die Lichtschwingungen mache und fortpflanze, oder dass wenigstens beide so innig mit einander verbunden seien, dass die Beobachtungen der Lichtschwingungen Aufschluss über das Verhalten des elektrischen neutralen Mediums zu geben vermöchten.

In gleicher Weise wie seine Zeitgenossen schlug Weber 1875 vor, dass sich die Licht- und Wärmestrahlung in diesem materiellen Äther wellenförmig ausbreitet. Obwohl die Physiker jener Zeit keine klaren Beweise für die Eigenschaften dieses Mediums hatten, glaubte Weber, dass man sich eine Vorstellung von dessen Verhalten machen kann, wenn man annimmt, dass dieses Medium aus elektrischen Teilchen besteht. Laut Weber bestanden alle Körper aus positiven und negativen elektrischen Teilchen in verschiedenen Anordnungen und Bewegungszuständen. Er versuchte, alle physikalischen Phänomene auf der Grundlage dieser Hypothese abzuleiten. Dies beinhaltete elektrostatische, magnetostatische, galvanische, elektrodynamische und thermische Phänomene. Im Jahr 1875 schlug Weber vor, diese Reihe von Phänomenen um optische Phänomene und Wärmestrahlung zu erweitern. Er schrieb hierzu:[7]

> Für diese Wärmeverbreitung durch Strahlung im leeren Raume oder in Isolatoren gilt bekanntlich dasselbe wie für die Lichtstrahlung, nämlich dass sie durch Wellenfortpflanzung vermittelt wird, was die Existenz eines wellenfortpflanzenden Mediums voraussetzt. Die Beschaffenheit dieses Mediums hat man bisher aus den Gesetzen der Wellenbewegungen, wie sie aus den Beobachtungen der Lichterscheinungen gefunden worden, kennen zu lernen gesucht; bestände nun aber dieses Medium aus Elektricität, und besässe man nähere Kenntniss von seiner Konstitution, so würde es möglich sein, aus dem Grundgesetze der elektrischen Wirkung die Gesetze jener Wellenbewegungen zu entwickeln und die Lichterscheinungen daraus zu erklären, was auch wirklich auf verschiedene Weise versucht worden ist, worauf aber näher einzugehen hier zu weit führen würde.

[7] [Web75, Webers *Werke*, Band 4, S. 343].

In einer Arbeit aus dem Jahr 1878 und ebenfalls in seiner posthum veröffentlichten Arbeit behielt Weber die Idee eines granularen oder korpuskularen, aus elektrischen Partikeln bestehenden Äthers bei. Aber jetzt nahm er an, dass er nur aus positiven elektrischen Molekülen besteht.[8]

[8][Web78, Webers *Werke*, Band 4, S. 383 und 394-395], [Web94a, Webers *Werke*, Band 4, S. 480, 489-491, 506, 516-518 und 524-525] und [Web08, S. 3, 15-17, 35, 48-51 und 57-58].

Kapitel 9

Optische Eigenschaften des Weberschen Planeten-Modells des Atoms

Weber vertrat immer eine Wellentheorie des Lichts. So verglich Weber zum Beispiel in seinem gemeinsamen Buch mit seinem Bruder, dem Physiologen Ernst Heinrich Weber, die Wellentheorie und Newtons Emanationstheorie und wies auf die Vorteile einer Wellenausbreitung durch einen Äther hin.[1]

Weber thematisierte Wechselströme in Abschnitt 16 seiner ersten großen Abhandlung von 1846, wobei er den konstant fließenden Strom von einem Wechselstrom unterscheidet, der in sehr kurzen aufeinanderfolgenden Zeitintervallen ständig die Richtung umkehrt. Er stellte dann eine kühne Hypothese auf, in dem er die Möglichkeit in Betracht zog, dass einfallende Lichtwellen in den elektrischen Flüssigkeiten einer materiellen Substanz elektrische Schwingungen erzeugen könnten! Soweit bekannt, war dies das erste Mal, dass er auf eine mögliche Verbindung zwischen Licht und Elektrizität hinwies:[2]

> Da nun die progressive Bewegung der Elektricität in der Natur so häufig vorkommt, so ist nicht einzusehen, warum nicht, bei so grosser Beweglichkeit, auch bisweilen Verhältnisse eintreten sollten, welche eine schwingende Bewegung begünstigten. Wenn z. B. die Lichtundulationen eine Wirkung auf die elektrischen Fluida übten und das Gleichgewicht derselben zu stören vermöchten, so würde gewiss zu erwarten sein, dass diese *Wirkungen* der Lichtundulationen sich der Zeit nach eben so periodisch gestalteten, wie die *Lichtundulationen selbst*, so dass das Resultat in einer *elektrischen Schwingung*

[1] [WW93, Webers *Werke*, Band 5, Absätze 306 bis 313].

[2] [Web46, Webers *Werke*, Band 3, S. 124] und [Web07, S. 76].

bestände, die wir aber mit unseren Instrumenten nicht zu entdecken vermöchten.

Der elektromagnetische Einfluß auf optische Phänomene war seit 1845 bekannt, als Faraday die magnetische Rotation der Polarisationsebene des Lichts entdeckte.[3] Er beobachtete diese Drehung des Licht beim Durchgang durch einer Art schweren Glases, das sich in einem starken Magnetfeld in Richtung der Lichtausbreitung befand, oder in einem Versuchsaufbau, bei dem das Glas von einem galvanischen Strom spiralförmig in einer Ebene orthogonal zum Lichtstrahl umflossen wurde. Weber kannte diese Entdeckung sehr wohl und erwähnte sie in seiner Abhandlung von 1846, wie aus dem Zitat in Kapitel 8 hervorgeht. Dort macht er den Vorschlag, der Äther, von dem angenommen wird, dass er Lichtschwingungen weiterleitet, könnte ein neutrales elektrisches Medium sein.

Carl Neumann (1832-1925), der Sohn von Franz Neumann (1798-1895), behandelte in seiner Dissertation von 1858 die Rotation der Polarisationsebene des Lichts durch Magnetismus mit mathematischen Methoden aus der Perspektive der Weberschen Elektrodynamik. Fünf Jahre später veröffentlichte er eine detailliertere Darstellung seiner Theorie. Er schlug eine Wechselwirkung zwischen Ätherteilchen und den Molekülen des Körpers in Abhängigkeit von äußeren magnetischen Kräften vor. Aber diese Kräfte würden nur auf bewegliche Ätherteilchen wirken, die vorher erregt worden waren, nicht aber auf stationäre Ätherteilchen. Analog zu Webers Erklärung für den Diamagnetismus nahm er an, dass diese Kraft durch Ampèresche Molekularströme erzeugt würde, die ihrerseits durch diese magnetischen Kräfte im Körper induziert würden. Allerdings ist zu betonen, dass Neumann ein *Idealmodell* eines Ampèreschen Molekülarstroms verwendet hat, bei dem ein kontinuierlicher Strom um das Molekül herum fließt, wie bei den Ringen des Saturns. Dabei könnten diese induzierten Molekülarströme auf die Teile des Äthers nach dem Weberschen Kraftsgesetz einwirken, analog der gegenseitigen Wechselwirkung zweier elektrischer Ströme. Neumanns Theorie war ein erster Versuch, das Webersche Gesetz auf optische Phänomene anzuwenden.[4]

Im Jahr 1862 postulierte Weber die Stimulierung von Wärme- oder Lichtwellen durch molekulare Ströme.[5] Neumanns *Idealmodell* eines Ampèreschen Molekularstromes dagegen konnte diese Wellen im Äther aus dem angegebenen Grund nicht erregen. Daher entwickelte Weber in dieser Arbeit von 1862 noch einmal ein Modell für *diskrete* oder *korpuskulare* Ampèreschen Molekularströme, ähnlich dem Modell, das er 1852 vorgestellt hatte und hier in Abschnitt 3.5 beschrieben wurde. Diese entscheidende Veränderung ermöglichte die Anregung von Lichtwellen durch molekulare Ströme im Äther. Der einzige Unterschied dieses Modells in Bezug auf Webers Modell von 1852 besteht darin, dass Weber nun die Vorzeichen der mobilen und stationären elektrischen Ladungen umkehrte. In dieser Arbeit von 1862 versah Weber sein Planetenmodell des Atoms

[3] [Far89, Serie XIX, Artikel 2146-2242], [Far52, Serie XIX, Artikel 2146-2242] und [Far65b, Serie XIX, Artikel 2146-2242].

[4] [Wie60, S. 194-195].

[5] [Web62, Webers *Werke*, Band 4, S. 94-96].

mit optischen Eigenschaften, nämlich der möglichen Erzeugung von Lichtwellen durch den Äther.

Bei der Diskussion der Neumannschen Arbeit zur Faraday-Rotation finden sich folgende Kommentare:[6]

> Zwar hat Neumann nach seinen Prämissen gefunden, dass keine Einwirkung elektrischer Molekularströme auf *ruhende Aethertheilchen* statt finden könne; es ist aber dabei zu beachten, dass diese Prämissen, dem Zwecke der Neumann'schen Untersuchung gemäss, welcher auf die Einwirkung der Molekularströme auf die schon vorhandenen mitten zwischen den Molekulen durch den Aether fortgepflanzten Wellenzüge beschränkt war, sich zwar auf Wirkungen der Molekularströme in sehr kleinen Entfernungen bezogen, doch aber noch immer die Zulassung einer *idealen* Vorstellung von den Molekularströmen gestatteten, wonach dieselben als eine *Superposition entgegengesetzt gleicher Ströme positiver und negativer Elektricität* betrachtet werden, was aber offenbar nicht gestattet ist, wenn es sich um die Erregung neuer Wellenzüge durch die elektrischen Molekularströme handelt, welche nur in der an die Molekularströme *unmittelbar angrenzenden Aetherschicht* Statt finden kann. Für diese Aetherschicht dürfen die in entgegengesetzter Richtung sich bewegenden positiven und negativen elektrischen Theilchen nicht mehr als zusammenfallend betrachtet werden. Denkt man sich dann also z. B. das negative Fluidum mit dem Molekule als fest verbunden, und das positive Fluidum allein in Molekularströmung begriffen, oder umgekehrt (eine Vorstellungsweise, welche sich dadurch empfiehlt, dass sie mit der Beharrung der Molekularströme ohne elektromotorische Kräfte bestehen kann) so leuchtet ein, dass die Verschiedenheit in Lage und Verhalten beider elektrischen Fluida im Bereiche des Molekuls zwar schon bei sehr geringen Entfernungen (wie sie Neumann betrachtet) nicht mehr beachtet zu werden braucht, worauf die Zulässigkeit jener *idealen* Vorstellung von den Molekularströmen beruht, dass sie doch aber für die *unmittelbar angrenzende Aetherschicht* von Bedeutung sein kann, zumal wenn das in Molekularströmung befindliche elektrische Fluidum *nicht stetig und gleichförmig* um das Molekule vertheilt wäre.

Wie oben gezeigt bestand das Bild, welches Carl Neumann sich von molekularen Strömen machte, aus den beiden elektrischen Flüssigkeiten, die sich auf geschlossenen Bahnen in entgegengesetzter Richtung um das Molekül herum bewegen, wie die Ringe des Saturns. Aber dieses Bild war, wie gesagt, nicht geeignet, um die Erzeugung neuer Wellen durch den Äther zu erklären. Wie aus dem obigen Zitat hervorgeht, modifizierte Weber Neumanns Konzeption, indem er die kontinuierliche Verteilung von positiven und negativen mobilen

[6] [Web62, Webers *Werke*, Band 4, S. 95].

Ladungen, die sich um das Molekül bewegen, jetzt, in Analogie zum die Erde umkreisenden Mond, als in Teilchen konzentriert betrachtete. Damit hatte Weber die Ampèreschen Molekularströme in ein Planetensystem umgewandelt!

Wie ebenfalls schon berichtet hatte er bereits 1852 eine ähnliche Idee, aber zu dieser Zeit dachte er sich die positive Ladung als stationär mit dem Molekül, während die negative Ladung das positive Molekül umkreiste. In dieser Arbeit von 1862 kehrte er die Zeichen der Ladung um. Es war in dieser Zeit noch nicht möglich zu entscheiden, ob eine positive oder negative Ladung bei dem Ampèreschen molekularen Strom fließt.

In der Folge dieser Arbeit von 1862 wies Weber sogar darauf hin, dass die Umlauffrequenz der geladenen Teilchen seines planetarischen Modells mit der Frequenz der angeregten Wärme- oder Lichtwellen identisch sein sollte. Das entsprechende Zitat lautet folgendermaßen:[7]

> Findet dann aber wirklich eine Störung des Gleichgewichts in der *unmittelbar angrenzenden Aetherschicht*, folglich eine Erregung von Aetherwellen, Statt, so leuchtet ein, dass dieselbe mit jedem Umlauf der Elektricität um das Molekul sich wiederholen, also die *Wellendauer* mit der *Umlaufszeit der elektrischen Theilchen* im Molekularstrome übereinstimmen muss.

Weber äußerte sich nicht zu den Konsequenzen der Energieerhaltung im Zusammenhang mit der Erzeugung von Wärme- oder Lichtwellen durch seine planetarischen molekularen Ströme.

Weber hielt es ebenfalls für möglich, dass man die optischen Eigenschaften seines planetarischen Modells benutzen könnte, um Informationen über die innere Beschaffenheit der Moleküle zu erhalten. Insbesondere könnten die Wellenlängen des emittierten Lichts den Schlüssel für Schlussfolgerungen aus den elektrischen molekularen Prozessen liefern:[8]

> Bei *leuchtenden Molekulen* ist aber die Wellendauer der von ihnen ausgesandten Wellenzüge aus optischen Versuchen genau bekannt; es würde also, wenn die angenommene Relation zwischen elektrischen Molekularströmen und dem Lichtäther, nach Neumann's Idee, sich bestätigte, hiernach möglich werden, aus optischen Versuchen über das Verhalten der die Molekularströme bildenden Elektricität nähere Auskunft zu erhalten.

Im Jahr 1876 näherte sich Zöllner dieser Argumentation von der anderen Seite, in dem er die inneren Eigenschaften eines planetaren Modells nutzte, um die Spektrallinien der chemischen Elemente abzuleiten! Das entsprechende Zitat lautet folgendermaßen:[9]

---

[7] [Web62, Webers *Werke*, Band 4, S. 95].
[8] [Web62, Webers *Werke*, Band 4, S. 95-96].
[9] [Zol76, Vorrede, S. XXI].

> Die von Ihnen [Weber] entwickelten Gesetze der Schwingungen eines elektrischen Atomenpaares [...] werden wahrscheinlich zur analytischen Bestimmungen der Zahl und Lage der Spectral-Linien der chemischen Elemente und ihres Zusammenhanges mit den Atomgewichten der letzteren führen.

Dies ist eine doch recht bemerkenswerte Aussage, die eine mögliche theoretische Erklärung der bekannten Spektrallinien der Elemente anzeigt. Zu der damaligen Zeit gab es noch keine detaillierte Erklärung für diese Spektrallinien. Die Spektralanalyse der chemischen Elemente wurde 1859 von R. W. Bunsen (1811-1899) und G. R. Kirchhoff (1824-1887) entwickelt, während das vollständige quantitative Verständnis der Spektralreihen für jedes spezifische Atom erst im 20. Jahrhundert erreicht wurde. Auf jeden Fall ist es erstaunlich, wie weit Weber und Zöllner mit diesen Überlegungen ihrer Zeit voraus waren.

In diesem Zitat bezog sich Zöllner auf eine Arbeit Webers aus dem Jahr 1871, in der Weber die Schwingungsdauer von zwei Ladungen gleicher Polarität abgeschätzt hatte, die sich in einer Entfernung r kleiner als seine kritische Distanz ρ umkreisten, d. h. für $r < \rho$. Er fand heraus, dass diese Schwingungsperiode ungefähr zwischen $2r_0/c$ und $4r_0/c$ liegen sollte. Der folgende Kommentar verdeutlicht seinen Versuch, diese Schwingungsperiode mit der des sichtbaren Lichts in Verbindung zu bringen:[10]

> Setzt man $c = 439450 \cdot 10^6$ Millimeter/[Sekunde], so ergiebt sich aus letzterer Bestimmung, dass der Werth von ρ etwa zwischen 1/4000 und 1/8000 Millimeter liegen müsste, wenn diese Schwingungen den Lichtschwingungen an Schnelligkeit gleich sein sollten.

Wie von Hecht berichtet war es dieses Modell, von dem Weber zunächst ausging, um eine Grundlage für die Erzeugung von Lichtfrequenzen zu finden.[11]

---

[10] [Web71, Webers *Werke*, Band 4, S. 278] und [Web72, S. 129].
[11] [Hec96].

Kapitel 10

Webers voll entwickeltes Planeten-Modell des Atoms und das Perioden-System der Elemente

Webers voll entwickeltes Planeten-Modell des Atoms findet sich in seiner Arbeit, vorgestellt mit dem Titel *Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere über den Zusammenhang des elektrischen Grundgesetzes mit dem Gravitationsgesetze*. Diese achte größere Abhandlung, die vermutlich in den 1880er Jahren geschrieben wurde, wurde posthum 1894 veröffentlicht.[1] Der Text ist fragmentarisch und wurde zu Lebzeiten Webers nicht vollendet.

In dieser Arbeit stellte Weber noch einmal seine Grundhypothese vor, die da lautet: Alle Materie ist als aus nur zwei Grundbausteinen zusammengesetzt zu betrachten, nämlich aus entgegengesetzt geladenen Elementarteilchen, die Weber *elektrische Moleküle*, oder *einfache elektrische Teilchen* nannte.[2] Dem positiven Elementarteilchen wurde eine elektrische Ladung $+e$ und eine träge Masse ε zugeschrieben, dem negativen Elementarteilchen eine elektrische Ladung $e' = -e$ und eine träge Masse $\varepsilon' = a\varepsilon$. Es sei noch einmal festgehalten, dass Weber annahm, dass die elektrischen Ladungen dieser beiden Elementarteilchen die gleiche Größe haben, $|e'| = e$, dass er jedoch unterschiedliche Werte für deren träge Masse zuließ. Hier das entsprechende Zitat:[3]

> Aus dieser Gleichheit der *Elektricitätsmengen*, welche nach Zöllner für *alle einfachen elektrischen Moleküle* gilt, worauf die *Neutralität* der aus gleicher Zahl positiv und negativ elektrischen Moleküle gebildeten *ponderabelen Moleküle* beruht, folgt nun zwar auch die *Mas-*

[1] [Web94a] und [Web08].
[2] [Web94a, Webers *Werke*, Band 4, S. 479 und 492] und [Web08, S. 1 und 18].
[3] [Web94a, Webers *Werke*, Band 4, S. 482] und [Web08, S. 5].

sengleichheit aller *positive elektrischen* Moleküle untereinander, ebenso wie aller *negativ elektrischen* untereinander, aber es folgt daraus keineswegs die *Massengleichheit positiv und negativ elektrischer Moleküle*, sondern es muss die Entscheidung über Gleichheit oder Ungleichheit ihrer Masse der Erfahrung vorbehalten bleiben, sei es durch Ausführung direkter *Massenmessung* oder auf indirekten Wege durch Erforschung ihres Zusammenhanges mit anderen messbaren Erscheinungen.

10.1 Ableitung der Gravitationskraft aus dem Weberschen Gesetz zur elektrischen Kraft

Eines von Webers Hauptzielen in dieser Arbeit war es, die Gravitation mit der Elektrizität zu verbinden. Um dieses zu erreichen, versuchte er, das Gravitationsgesetz aus seinem fundamentalen Kraftgesetz abzuleiten und machte hierzu zwei wesentliche Annahmen, nämlich (unsere Wort in eckigen Klammern):[4]

1. *dass alle ponderabelen Moleküle blosse Verbindungen gleicher Mengen positiver und negativer Elektricität seien*, und dass

2. *die Anziehungskraft gleicher Mengen ungleichartiger Elektricität grösser sei als die Anstossungskraft [Abstossungskraft] derselben Mengen gleichartiger Elektricität.*

Ähnliche Hypothesen wie diese hatte schon Mossotti im Jahr 1836 aufgestellt.[5] Er wandte sie auf die abstoßenden Kräfte zwischen den Molekülen der Materie, auf die abstoßenden Kräfte zwischen den Atomen des Äthers und auf die Anziehungskräfte zwischen einem Molekül der Materie und einem Atom des Äthers an. Als Ergebnis dieser Ableitung erhielt er eine dem Newtonschen Gravitationsgesetz analoge Kraft. Zöllner hingegen wandte diese Hypothesen in qualitativer Weise auf die elektrostatischen Potenziale an.[6] Das heißt, er nahm an, dass das anziehende elektrostatische Potenzial zwischen zwei entgegengesetzt geladenen Teilchen ein wenig größer sei als das abstoßende elektrostatische Potenzial zwischen zwei positiv geladenen oder zwischen zwei negativ geladenen Teilchen. Auf diese Weise erhielt er eine anziehende Kraft zwischen zwei Paaren von Teilchen (jede Paar bestehend aus zwei entgegengesetzt geladenen Teilchen $+e$ und $-e$) ähnlich wie beim Newtonschen Gravitationsgesetz.

Weber verfolgte eine ähnliche Idee, wandte sie aber quantitativ auf sein fundamentales Kraftgesetz an. Auf diese Weise leitete er ein Kraftgesetz ab, das dem Newtonschen Gravitationsgesetz entsprach, aber nun auch Terme enthielt, die von der relativen Geschwindigkeit und der relativen Beschleunigung zwischen den wechselwirkenden Massen abhingen.

[4] [Web94a, Webers *Werke*, Band 4, S. 481] und [Web08, S. 4].
[5] [Mos36].
[6] [Zol78a] und [Zol82].

Aus der ersten seiner beiden Hypothesen folgt, dass jedes ponderable Molekül aus einer ganzen Zahl n positiver elementarer Teilchen und einer gleichen Anzahl n negativer elementarer Teilchen besteht. Das heißt, es wäre elektrisch neutral und bestände aus $+ne$ positiven Elementarladungen und $-ne$ negativen Elementarladungen.

Es lässt sich nun aufzeigen, wie die zweite der beiden oben aufgeführten Hypothese verwendet werden kann, um ein Analogon zum Newtonschen Gravitationsgesetz abzuleiten. Ausgangspunkt ist das denkbar einfachste ponderable Molekül, bestehend aus zwei umeinander kreisenden Elementarladungen, einer positiven und einer negativen. Wie in Abschnitt 6.5 gezeigt wurde, hatte Weber 1871 eine Lösung für das Problem zweier Ladungsträger mit gegensätzlicher Polarität erhalten, die nach seinem Kraftgesetz miteinander wechselwirken. Diese spezielle Lösung war analog zur Keplerschen elliptischen Umlaufbahn, die sich aus dem Newtonschen Gravitationsgesetz ergibt. Die Argumentation Webers im Rahmen der beiden aufgestellten Hypothesen lässt sich an der Wechselwirkung zweier einfacher Moleküle verdeutlichen. Hierzu werden die beiden entgegengesetzt geladenen Teilchen des ersten Moleküls mit $+e_1$ und $-e_1$ und die beiden entgegengesetzt geladenen Teilchen des zweiten Moleküls mit $+e_2$ und $-e_2$ gekennzeichnet. Die Indizes 1 und 2 dienen hier nur zur Unterscheidung der beiden Moleküle als $|e_1| = |e_2| = e$. Die Wechselwirkung zwischen diesen beiden einfachsten ponderablen Molekülen besteht aus vier Kräften, nämlich der Kraft zwischen $+e_1$ und $+e_2$, der Kraft zwischen $+e_1$ und $-e_2$, der Kraft zwischen $-e_1$ und $+e_2$ und schließlich der Kraft zwischen $-e_1$ und $-e_2$. Die Summe dieser vier Wechselwirkungen führt aufgrund der zweiten Hypothese zu einer Anziehung zwischen dem ersten und dem zweiten ponderablen Molekül.

10.2 Die Vielfalt ponderabler Körper

Nach Weber sollten die positiven und negativen Teilchen, die die ponderablen Moleküle bilden, nicht als konzentriert in einem einzigen Punkt angesehen, sondern immer als in Bewegung und als getrennt voneinander gedacht werden. Sie könnten umeinander kreisen oder entlang der sie verbindenden Geraden oder dazu orthogonal vibrieren (unsere Anmerkungen hierzu in der Fußnote):[7]

> Können sich nun aber auch die beiden *gleichen Mengen* zweier ungleichartiger elektrischer Moleküle $+e$ und $-e$ zu einen ponderabelen Moleküle verbinden, so wird dabei doch keine Vereinigung *in einem Punkte* stattfinden, sondern so nahe beide Moleküle dabei einander kommen mögen, werden sie doch immer, indem sie sich um einander drehen, voneinander getrennt bleiben; beide, die zusammen die Masse $(1+a)\varepsilon$ besitzen, werden aber stets in einem sehr kleinen Raume[8] zusammen bleiben, der sich bei unveränderter Drehungsgeschwindigkeit nicht ändert, so dass einem solchen *ponderabelen Moleküle*

[7] [Web94a, Webers *Werke*, Band 4, S. 490] und [Web08, S. 16].
[8] Volumenraum v.

> eine bestimmte *Dichtigkeit* $d = [(1 + a)/v] \cdot \varepsilon$ zugeschrieben werden kann.

Obwohl Weber alle ponderable Materie auf eine Kombination von nur zwei Arten von elementaren geladenen Teilchen reduzieren wollte, war er sich bewusst, dass es eine große Anzahl von ponderablen Substanzen mit einer Vielzahl von intrinsischen Eigenschaften gab. Wie erklärt man diese enorme Komplexität aus so einfachen Elementen? Hierauf gab Weber die folgende Antwort:[9]

> Wären aber alle ponderabelen Körper wirklich blosse Verbindungen positiv und negativ elektrischer Moleküle, so würde es sich darum handeln, wie bei dieser allen ponderabelen Körpern zukommenden wesentlich gleichen Zusammensetzung die *unendliche Mannigfaltigkeit und Verschiedenheit* derselben erklärt werden könnte. Es könnte der *Grund aller dieser Verschiedenheiten* nur in verschiedener *Zahl, räumlicher Gruppirung* und *Bewegungsenergie* der in kleineren Gruppen vereinigten elektrischen Moleküle beider Art, die keinen Veränderungen durch äussere Einflüsse unterworfen zu sein brauchen, gefunden werden.

Einige dieser Arrangements wären laut Weber sehr stabil und könnten nicht durch äußere Einflüsse verändert werden, während andere Gruppen jedoch nicht so stabil wären und durch geeignete externe Einwirkungen verändert werden könnten.

Wie in Kapitel 6 gezeigt wurde, ist nach dem Weberschen Gesetz eine Anziehung zweier oder mehrerer geladenen Teilchen der selben Polarität möglich, sofern sie sich sehr nahe beieinander befinden. Ist insbesondere der Abstand r zwischen irgendwelchen zwei Ladungsträgern dieser Gruppe anfänglich kleiner als der kritische Abstand ρ, so würden sich diese immer relativ zueinander in einem kugelförmigen Volumen mit dem Durchmesser ρ bewegen. In seiner Arbeit von 1871 prägte Weber den Namen *molekulare Bewegung* für diesen Aggregatzustand geladener Teilchen gleichen Zeichens, die sich gegenseitig anziehen und relativ zueinander bewegen. Er gab dieser Gruppe nun einen anderen Namen, er nannte sie nun *unscheidbare Moleküle*.[10] Weber hat sie auf treffliche Weise charakterisiert, indem er sagte, dass diese Gruppe eine abgeschlossene Welt für sich selbst bilde aufgrund der Tatsache, dass die innere Kraft, die diese Gruppe verbindet, so groß sei, dass es extrem schwierig sein würde, sie durch äußere Einflüsse auseinanderzubrechen. Ein diesbezüglich typisches Zitat von Weber lautet:[11]

> Hierzu kommt, dass nicht blos zwei oder drei, sondern eine noch viel grössere Zahl *gleichartig elektrischer Theilchen* in so kleinem Raume

[9] [Web94a, Webers *Werke*, Band 4, S. 491] und [Web08, S. 17].
[10] [Web94a, Webers *Werke*, Band 4, S. 492-493] und [Web08, S. 18-19].
[11] [Web94a, Webers *Werke*, Band 4, S. 493] und [Web08, S. 19].

zusammen sein können, ohne dass die Entfernung irgend eines Theilchens von einem anderen $\geq \rho$ sei, so dass alle diese Theilchen zusammen ein ebenfalls *untrennbares ewig zusammen bleibendes Molekül* bilden. Endlich kommt hinzu, dass diese in dem engen Raume eines Moleküles eingeschlossenen Theilchen ebenso wenig, wie die ursprünglich in grösseren Räumen vertheilten, in Ruhe zu verharren brauchen, sondern die mannigfaltigsten Bewegungen theils *zusammen*, in enger Verbindung miteinander, im Weltenraume machen können, theils auch *gegeneinander*, innerhalb des engen Raumes, in dem sie sich befinden, ohne darum aufzuhören, eine *untrennbare Gruppe* oder einziges *zusammengesetztes Molekül* zu bilden. Jedes solches zusammengesetztes Molekül bildet eine abgeschlossene Welt für sich, und nach Verschiedenheit der Zahl einfacher elektrischer Theilchen, die es enthält, und deren gegenseitigen Bewegungen kann ein solches zusammengesetzes Molekül sehr verschiedene Wirkungen auf alle anderen ausserhalb liegenden Moleküle ausüben, wonach ihnen *sehr verschiedene Eigenschaften* zukommen können. Fügt man hinzu, dass die Zahl der einfachen elektrischen Theilchen, welche auf diese Weise vereinigt sein können, wenn auch nicht unbeschränkt, doch sehr gross sein kann, so lässt sich denken, dass solche ewig unveränderliche, theils positiv, theils negativ elektrische Theilchen oder Moleküle sich wieder zu sehr *verschiedenartigen ponderabelen Körpern* verbinden können, z. B. von sehr verschiedener Dichtigkeit oder Härte u. s. w., denn jene aus einer grösseren Zahl *gleichartig elektrischer Theilchen* bestehenden, *theils positiv, theils negativ elektrischen Gruppen*, von denen jede doch nur einen kugelförmigen Raum vom Durchmesser ρ einnimmt, müssen einander offenbar mit *viel grösserer Kraft* anziehen und sich verbinden, als ein einfaches positiv elektrisches mit einem einfachen negativ elektrischen Moleküle.

Weber konnte nun seine materiellen Moleküle in drei verschiedene Klassen einteilen.

1. Die erste Klasse bestand aus seinen beiden elementaren Ladungen $+e$ und $e' = -e$ mit den trägen Massen ε bzw. $\varepsilon' = a\varepsilon$. Er nannte sie *einfache positive und negative elektrische Moleküle* und kennzeichnete sie durch die Symbole $(+1)$ und (-1).

2. Die zweite Klasse bestand aus seinen positiven und negativen unscheidbaren elektrischen Molekülen. Jedes dieser zusammengesetzten Moleküle sollte n Elementarladungen derselben Polarität enthalten (mit $n \geq 2$), die innerhalb eines sehr kleinen kugelförmigen Volumens mit dem Durchmesser ρ miteinander wechselwirken. Sie wurden durch das Symbol $(+n)$ bzw. $(-n)$ gekennzeichnet, abhängig vom Vorzeichen der betroffenen Anteile. Zum Beispiel kann ein zusammengesetztes unscheidbares positives elektrisches Molekül existieren, das drei positiven Ladungen, $(+3)$ enthält, oder

ein zusammengesetztes unscheidbares negatives elektrisches Molekül, das fünf negativen Ladungen, (-5) enthält.

3. Die dritte Klasse enthielt die ponderablen Moleküle, die Anordnungen von gleichen Anzahlen positiver und negativer elektrischer Moleküle darstellten.

Indem er seine Analyse fortsetzte, fand Weber, dass jedes dieser ponderablen Moleküle eine Anziehungskraft nicht nur auf andere ponderable Moleküle, sondern ebenfalls sowohl auf eine elementare positive Ladung als auch auf eine elementare negative Ladung ausüben könnte. Auf Grund dieser Anziehungskraft, ausgeübt durch ein ponderables Molekül auf die positive (oder negative) elektrische Elementarladung, könnte diese Elementarladung in eine kontinuierliche Rotationsbewegung um das ponderable Molekül versetzt werden. Auf diese Weise konnte er die Existenz positiver und negativer ponderabler Ionen aufzeigen, obwohl er diesen modernen Ausdruck „Ion" nicht benutzte.

Dies erlaubte Weber, die ponderablen Moleküle in drei getrennte Gruppen einzuteilen, nämlich in neutrale ponderable Moleküle, sowie in positive und in negative ponderable Ionen. Er beschreibt diesen Sachverhalt folgendermaßen:[12]

> Vermöge der hiernach von einem jeden *ponderabelen* Moleküle nicht blos auf ein anderes *gleiches* Molekül, sondern auch auf jeden seiner beiden *Bestandtheile* ausgeübten Anziehungskraft würden alle diejenigen ponderabelen Moleküle, welche *zuerst* mit *positiv elektrischen Trabanten* an sich gefesselt haben, dagegen würden andere *ganz gleiche* ponderabele Moleküle, welche zuerst mit *negativ elektrischen* Moleküle zusammengetroffen wären, dieselben als *negativ elektrischen Trabanten* gefesselt haben, wonach *alle ponderabelen Moleküle* in drei Klassen zerfallen würden, welche als *positiv ponderabele, negativ ponderabele* und *neutrale* unterschieden werden könnten, von denen die letzten solche ponderabele Moleküle wären, die noch keine Trabanten an sich gezogen hätten.

10.3 Das Perioden-System der chemischen Elemente

Nach Weber sollten die neutralen, ponderablen Moleküle aus der gleichen Anzahl von positiven und negativen elektrischen Molekülen bestehen.

Er stellte sie graphisch wie in Abbildung 10.1 dar.[13]

Im Folgenden wird die Bedeutung eines dieser neutralen, ponderablen Moleküle geklärt an hand eines bestimmten Beispiels, nämlich dem Molekül $\begin{bmatrix} +3 \\ -2 \\ -1 \end{bmatrix}$.

[12] [Web94a, Webers *Werke*, Band 4, S. 485] und [Web08, S. 11].
[13] [Web94a, Webers *Werke*, Band 4, S. 495] und [Web08, S. 22].

$$\begin{bmatrix}+1\\-1\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}-2\\+1\\+1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+2\\-2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+2\\-1\\-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+1\\+1\\-1\\-1\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}-2\\-1\\+1\\+1\\+1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-3\\+1\\+1\\+1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-3\\+2\\+1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+3\\-3\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+3\\-2\\-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+3\\-1\\-1\\-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+2\\+1\\-1\\-1\\-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+1\\+1\\+1\\-1\\-1\\-1\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}-2\\-1\\-1\\+1\\+1\\+1\\+1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-2\\-2\\+1\\+1\\+1\\+1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-3\\-1\\+1\\+1\\+1\\+1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-4\\+1\\+1\\+1\\+1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-4\\+2\\+1\\+1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-4\\+2\\+2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-4\\+3\\+1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+4\\-4\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+4\\-3\\-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+4\\-2\\-2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+4\\-2\\-1\\-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+4\\-1\\-1\\-1\\-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+3\\+1\\-1\\-1\\-1\\-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+2\\+2\\-1\\-1\\-1\\-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+2\\+1\\+1\\-1\\-1\\-1\\-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+1\\+1\\+1\\+1\\-1\\-1\\-1\\-1\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}-2\\-1\\-1\\-1\\+1\\+1\\+1\\+1\\+1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-2\\-2\\-1\\+1\\+1\\+1\\+1\\+1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-3\\-1\\-1\\+1\\+1\\+1\\+1\\+1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-3\\-2\\+1\\+1\\+1\\+1\\+1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-4\\-1\\+1\\+1\\+1\\+1\\+1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-5\\+1\\+1\\+1\\+1\\+1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-5\\+2\\+1\\+1\\+1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-5\\+2\\+2\\+1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-5\\+3\\+1\\+1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-5\\+3\\+2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-5\\+4\\+1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+5\\-5\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+5\\-4\\-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+5\\-3\\-2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+5\\-3\\-1\\-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+5\\-2\\-2\\-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+5\\-2\\-1\\-1\\-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+5\\-1\\-1\\-1\\-1\\-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+4\\+1\\-1\\-1\\-1\\-1\\-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+3\\+2\\-1\\-1\\-1\\-1\\-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+3\\+1\\+1\\-1\\-1\\-1\\-1\\-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+2\\+2\\+1\\-1\\-1\\-1\\-1\\-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+2\\+1\\+1\\+1\\-1\\-1\\-1\\-1\\-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}+1\\+1\\+1\\+1\\+1\\-1\\-1\\-1\\-1\\-1\end{bmatrix}$$

etc.

Abbildung 10.1: Die ponderablen Moleküle nach Weber.

Die Zahl $+3$ kennzeichnet drei elementare Ladungen $+e$, die sich derart bewegen sollen, dass die Entfernung von zwei dieser Ladungen stets kleiner sei als die kritische Distanz ρ. Diese untrennbare oder unscheidbare Gruppe, bestehend aus drei Ladungen gleicher Polarität, würde sich wie ein einzelnes Teilchen bewegen. Das Gleiche gilt für die Zahl -2, die einen anderen untrennbaren Teil des ponderablen Moleküls kennzeichnet. Diese Gruppe -2 sollte sich aus zwei negativen Elementarladungen $-e$ zusammensetzen, die sich derart bewegen, dass ihr Abstand immer kleiner ist als der kritische Abstand ρ, und auch diese untrennbare Gruppe -2 würde sich als einzelnes Teilchen bewegen. Und schließlich würde die Zahl -1 ein einfaches negativ elektrisches Molekül kennzeichnen. Dieses ponderable Molekül $\begin{bmatrix}+3\\-2\\-1\end{bmatrix}$ kann man sich somit vorstellen als zusammengesetzt aus drei Ladungsteilchen $+3e$, $-2e$ und $-e$, die sich auf drei verschiedenen Umlauf-

bahnen umeinander bewegen. Weber beschrieb dies folgendermaßen:[14]

> Hierin entspricht nun jede von den in denselben Klammern eingeschlossenen Zahlen einer Zahl um einander sich bewegender gleichartig elektrischer Theilchen, deren Entfernung von einander dabei kleiner als ρ bleibt. Diese unscheidbaren Theilchen bewegen sich zusammen in *einer* Bahn, und es entspricht jeder Zahl eine besondere Bahn. Die Bahnen ungleichelektrischer Theilchen werden durch wechselseitige Anziehung derselben zusammengehalten. Die in jeder Zahl begriffenen Moleküle sind demnach unscheidbar und ebenso auch alle Moleküle der *zweiten* von den *oben angeführten drei Klassen*, auch die, welche aus mehreren einfachen Molekülen zusammengesetzt sind, weil nämlich diese Moleküle gleichartig und ihre Entfernungen von einander $< \rho$ sind.

Weber sprach von den Molekülen $\begin{bmatrix} +n \\ -n \end{bmatrix}$ als *ponderable Elementarkörper.*[15] Hiermit könnte entweder das spezifische Element mit zwei unscheidbaren elektrischen sich umkreisenden Teilchen gemeint sein, (wobei jedes Teilchen aus n Elementarladungen zusammengesetzt ist, die in einem kugelförmigen Volumen mit dem Durchmesser ρ umeinander kreisen), oder die Gesamtheit der gegebenen Möglichkeiten, die durch die n-te Zeile von Abbildung 10.1 dargestellt wird.

Mit den ponderablen elementaren Körpern $\begin{bmatrix} +n \\ -n \end{bmatrix}$ wollte Weber die Atome der chemischen Elemente des Periodensystems charakterisieren. Der einfachste ponderable elementare Körper ist Wasserstoff mit dem Atomgewicht = 1. Er wurde als $\begin{bmatrix} +1 \\ -1 \end{bmatrix}$ dargestellt. In dem Diagramm mit fünf Linien von Abbildung 10.1 listete Weber alle möglichen Konfigurationen von $+e$ und $-e$ auf und zwar von Atomgewicht = 1 bis zu Atomgewicht = 5. In der n-ten Zeile finden sich die möglichen Konfigurationen von $\begin{bmatrix} +n \\ -n \end{bmatrix}$. Alle Konfigurationen einer einzelnen Zeile haben das gleiche Atom- oder Molekulargewicht. Ein chemisches Atom mit dem Atomgewicht n hätte die Konfiguration $\begin{bmatrix} +n \\ -n \end{bmatrix}$. Kohlenstoff und Sauerstoff zum Beispiel wurden von Weber als $\begin{bmatrix} +12 \\ -12 \end{bmatrix}$ bzw. als $\begin{bmatrix} +16 \\ -16 \end{bmatrix}$ gekennzeichnet. Sie wären entlang der 12. bzw. 16. Linie zu finden.

Ein ponderables Molekül würde von einem anderen ponderablen Molekül angezogen werden, so dass ein Verbund ponderabler, sich gegenseitig umkreisender Moleküle existieren kann. Weber nannte diese Systeme *binäre zusammengesetzte ponderable Körper*. Diese würden der modernen chemischen Terminologie entsprechen, d. h. Verbindungen elementarer Atomen führen zu stabilen Systemen.

[14] [Web94a, Webers *Werke*, Band 4, S. 494-496] und [Web08, S. 23].
[15] [Web94a, Webers *Werke*, Band 4, S. 496].

Weber schloss seine Analyse dieses Abschnitts wie folgt ab:[16]

> Beachtet man noch die ausserordentliche Mannigfaltigkeit, welche in jedem dieser *ponderabelen* Moleküle in Beziehung auf die Bahnen und lebendigen Kräfte der einzelnen elektrischen Theilchen, aus denen sie zusammengesetzt sind, stattfinden können, so ergiebt sich die Möglichkeit von *unendlich vielen verschiedenen Arten solcher Moleküle.*

Zwischen den verschiedenen Variationen von Webers ponderablen Molekülen (unseren modernen elementaren Atomen) gibt es insbesondere folgende Typen:

$$\begin{bmatrix} +n \\ -1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ -1 \end{bmatrix}$$

Hier wird von n positiven elektrischen elementaren Teilchen ausgegangen, die sich relativ zueinander in einem sehr kleinen Volumen mit dem Durchmesser ρ (der kritischen Distanz) bewegen. Die Anziehungskraft zwischen diesen positiven Teilchen ist so stark, dass sich dieses positive System selbst wie ein einzelnes Teilchen verhält. Es entspräche dem Kern eines modernen Atoms. Um diesen positiven Kern kreisen n negative Elementarteilchen auf getrennten Umlaufbahnen. Sie entsprächen den negativen Elektronen, die den positiven Kern umkreisen. Da Weber die träge Masse ε jedes elementaren positiven Teilchens nicht mit der trägen Masse $\varepsilon' = a\varepsilon$ jedes elementaren negativen Teilchens gleichsetzte, war die Masse dieses positiven Kerns nicht notwendigerweise n mal die Masse jedes negativen, ihn umkreisenden Teilchens.

Die Analogie zwischen dieser Webersche Konzeption und dem Atommodell von Rutherford ist erstaunlich.

Webers *unscheidbare Moleküle* (das heißt, der positive Kern dieser ponderablen Moleküle) entspräche den modernen Kernen der atomaren Elemente. In Webers Modell gibt es jedoch kein Teilchen, das dem Neutron entspricht. Auf der anderen Seite hat es den erstaunlichen Vorteil, stabil zu sein und durch rein elektrische Wechselwirkungen zusammengehalten zu werden, ohne die Notwendigkeit, separate Kräfte einzuführen, wie die schwachen und starken Kernkräfte der modernen Physik. Soweit bekannt ist dies das einzige Modell, das jemals für einen positiven Kern vorgeschlagen wurde, in dem dieser Kern durch rein elektrische Wechselwirkungen stabilisiert wird. Weber konnte dieses Merkmal nur aufgrund einer einzigartigen Eigenschaft seines Kraftgesetzes erhalten, nämlich Gleichung (6.2). Diese Eigenschaft hängt mit der Tatsache zusammen, dass sein Kraftgesetz nicht nur von der Entfernung zwischen den wechselwirkenden Teilchen abhängt, sondern auch von ihrer relativen radialen Beschleunigung. Der

[16] [Web94a, Webers *Werke*, Band 4, S. 499] und [Web08, S. 27].

Koeffizient, mit dem diese Beschleunigung multipliziert wird, hat die gleiche Einheit wie die träge Masse, nämlich Kilogramm (kg). Darüber hinaus ist dieser Koeffizient proportional zum Produkt der beiden interagierenden Ladungen ee' und umgekehrt proportional zur Entfernung r. Bei einer sehr geringen Entfernung kann dieser Koeffizient einen Werte annehmen, der größer ist als die mechanische träge Masse eines dieser Teilchen. Diese Ladungen können sich dann so verhalten, als hätten sie eine effektive träge Masse, die eine Funktion der sie trennenden Entfernung ist. Darüber hinaus kann diese effektive träge Masse in Abhängigkeit von dem Vorzeichen von ee' positiv oder negativ sein. Insbesondere werden Ladungen derselben Polarität, die sich relativ zueinander in einem kugelförmigen Volumen mit dem Durchmesser ρ bewegen, sich so verhalten, als hätten sie eine *negative* träge Masse. Das hat zur Folge, daß sie sich nicht abstoßen, wie es normalerweise bei makroskopischen Entfernungen beobachtet wird, sondern sich gegenseitig anziehen! Dies ist eine der faszinierendsten und einzigartigsten Eigenschaften der Weberschen Elektrodynamik.[17]

10.4 Anwendbarkeit auf chemische Bindungen

Wie in Kapitel 6 gezeigt wurde, hatte Weber 1871 die Bewegung zweier geladener Teilchen analysiert, die nach seinem Kraftgesetz wechselwirken. Er fand einige *permanente Zustände* oder *Dauerzustände*, in denen sich die Teilchen zwischen zwei begrenzenden Radien umkreisen. Er fand ebenfalls einige *nicht beständige Zustände* oder *instabile Zustände*, in denen die beiden wechselwirkenden Teilchen nicht miteinander verbunden waren. Dies wäre analog zu den hyperbolischen Coulomb-Bahnen zweier entgegengesetzter (ungleichartiger) und damit sich gegenseitig anziehender Ladungen.[18] In dieser Arbeit von 1871 stellte Weber die kühne Hypothese auf, dass die chemischen Bindungen zwischen Atomen elektrischen Ursprungs sein könnten. In der Chemie gibt es Atompaare, wie die Gase H_2 oder O_2, und ebenfalls mehrere aus Atomen zusammengesetzte Moleküle, wie H_2O usw. Falls Webers Hypothese wirklich zuträfe, könnten seine elektrischen Aggregatzustände auf chemische Atomgruppen anwendbar sein. Weber formulierte wie folgt (unsere Kommentare in der Fußnote):[19]

Anwendbarkeit auf chemische Atomengruppen.

> [...]
>
> Es liegt daher die Frage nahe, ob der Grund von der Beharrlichkeit gewisser Atomenzustände nicht vielleicht in solchen Gesetzen der Wechselwirkung zu finden sei, wie hier für die elektrischen Theilchen aufgstellt und angenommen worden sind. [...] Und es dürfte hierbei insbesondere zu beachten sein, dass dieselben Kräfte, welche

[17] [Ass93], [Ass94] und [Ass99].
[18] [Sym71, Abschnitt 3.16].
[19] [Web71, Webers *Werke*, Band 4, S. 278-279] und [Web72, S. 129-130].

> den von einfachen und den von Atomenpaaren gebildeten *Aggregatzustand der Elektricität* bedingen, möglicherweise auch zwei ebensolche *Aggregatzsustände ponderabler Körper* bedingen können. Denn bei der allgemeinen Verbreitung der Elektricität darf angenommen werden, dass an jedem ponderablen Atome ein elektrisches Atom haftet. [...] Nimmt man nun die Werthe[20] von ε und ε' so gross, dass darin die Massen der an den elektrischen Atomen haftenden ponderablen Atome mit eingeschlossen sind, so finden alle zunächst blos für *elektrische Atome* gefundenen Bestimmungen auch auf die mit elektrischen verbundenen *ponderablen Atome* Anwendung.

Das heißt, unter der Annahme, dass sich ein positives oder ein negatives elektrisches Teilchen mit einem ponderablen Atom verbinden könnten, gäbe es permanente Aggregatzustände von chemischen Atomen sowie ebenfalls Aggregatzustände ohne Permanenz (instabile Zustände). Webers elektrodynamisches Kraftgesetz könnte somit einen Schlüssel zum Verständnis der chemischen Bindungen von Atomen liefern.

In seiner posthum veröffentlichten Arbeit entwickelte Weber diese Idee ein wenig weiter. Hier stellte er ein Modell vor mit einer möglichen Beziehung zu einer elektrochemischen Bindung. Sein Ziel war es, den festen Zusammenhalt von Metallen zu verstehen. Wie in Kapitel 5 gezeigt wurde, hatte Weber seit 1852 ein Modell für einen metallischen Leiter wie Kupfer entwickelt. In diesem Modell betrachtete er diesen Leiter als eine Folge von im Raum getrennten, positiven ponderablen Atomen, wobei jedes Atom von einem umlaufenden negativen Teilchen mit vernachlässigbarer Masse im Vergleich zur Masse des ponderablen Atoms umgeben ist. Später änderte er die Zeichen der stationären und umlaufenden Teilchen (bis in die 1880er Jahre war die Polarität der umlaufenden Ladung noch nicht experimentell bestimmt worden). Weber gab nun einen Grund an für die Kohäsion fester Stoffe:[21]

> Der wirkliche sehr *feste Zusammenhalt* der ponderabelen Moleküle *metallischer Leiter* dürfte seinen Grund darin haben, dass jedes *positiv elektrische* Molekül in seiner Kreisbahn nicht blos das *eine negativ elektrische* Molekül des *einen* ponderabelen Nachbarmoleküls umschliesst, sondern auch noch das *andere negativ elektrische* Molekül des *anderen* ponderabelen Nachbarmoleküls. Dasselbe gilt von der Kreisbahn jedes *negativ elektrischen* Moleküls und zwei positiv elektrischen Nachbarmolekülen.

Nach unserem heutigen Kenntnisstand bezüglich der metallischen Bindung ist diese Hypothese nicht zutreffend. Aber in jedem Fall präsentierte Weber hier eine neue Idee. H. Davy (1778-1829) und J. J. Berzelius (1779-1848) hatten bereits 1806 bzw. 1811 (und 1819) die Verwendung der Coulomb-Kraft innerhalb elektrochemischer Theorien vorgeschlagen.[22] Weber ging noch einen Schritt

[20] Werte der Trägemassen.
[21] [Web94a, Webers *Werke*, Band 4, S. 508] und [Web08, S. 27].
[22] [Wie60, S. 219-220] und [Wie67, S. 177].

weiter und präsentierte eine dynamische elektrische Kraft, um chemische Bindungen zu erklären. Dieses von Weber in seiner posthumen Arbeit vorgestellte Modell ist analog zu der von G. N. Lewis (1875-1946) im Jahr 1916 entwickelten kovalenten Bindungstheorie, die auf einer Bindung durch ein Elektronenpaar zweier benachbarter Atome beruht.

10.5 Offene Themen

In seiner posthum veröffentlichten Arbeit wies Weber auf einige Probleme hin, die noch gelöst werden müssten, solange man der Hypothese folgt, dass die ponderablen Moleküle aus positiven und negativen elementaren geladenen Teilchen zusammengesetzt sind. Zum Beispiel wäre es notwendig, die Mechanik von expandierbaren Gasen, von nicht expandierbaren Flüssigkeiten und von festen elastischen Körpern zu klären. Weber erhob nicht den Anspruch, diese äußerst komplexen Probleme auf der Basis seines fundamentalen Gesetzes der elektrischen Kraft zu lösen. Vielmehr sollten seine Ausführungen nur Vorschlagscharakter haben. Seine Ideen in dieser, wie in seiner Arbeit von 1871 bezüglich molekularer Bewegungen, ergeben sich aus folgendem Zitat:[23]

> Denn ohne die Kenntniss und genaue Berücksichtigung der ohne Zweifel bei den Molekularbewegungen zur Mitwirkung kommenden, *auf Molekularentfernungen beschränkten Molekularkräfte* kann den sich ergebenden Resultaten keine genaue *quantitative*, sondern nur innerhalb gewisser Schranken ein Art *qualitativer* Geltung zugeschrieben werden, welche nur für die erste Rekognoscirung des Gebiets Bedeutung habe.

Um beispielsweise die Ausdehnung von Gasen zu erklären, schlug Weber Folgendes vor:[24]

> Bei Begründung der Mechanik der Körper im *ersten der drei genannten Aggregatzustände*, nämlich der *Gase*, würde anzunehmen sein, dass dieselben aus *ponderabelen Kernen* bestehen, welche sich in grösseren Zwischenräumen von einander befinden und jeder von einem positiv elektrischen *Trabanten* begleitet wird.

Weber schlug das folgende Modell für die Moleküle von nicht expandierbaren Flüssigkeiten vor:[25]

> Zur Begründung der *Mechanik der Körper in dem zweiten der drei gennanten Aggregatzustände*, nämlich dem der *unausdehnsamen Flüssigkeiten*, würde anzunehmen sein, dass dieselben aus *ponderabelen Molekülen ohne Trabanten* bestehen, die sich vermöge der von ihnen

[23] [Web71, Webers *Werke*, Band 4, S. 268-269] und [Web72, S. 119].
[24] [Web94a, Webers *Werke*, Band 4, S. 514] und [Web08, S. 46].
[25] [Web94a, Webers *Werke*, Band 4, S. 514-515] und [Web08, S. 47].

wechselseitig auf einander ausgeübten *Gravitationskraft* um einander drehen.

In Bezug auf leitenden Körpers schlug Weber Folgendes vor:[26]

> Was Körper des ersteren, nämlich festen Aggregatzustands betrifft, so hat die Betrachtung der dazu gehörigen Metalle und ihres mit *Wärmeleitungsvermögen eng verbundenen elektrische Leitungsvermögens* zur Annahme *molekulärer* Konstitution geführt, wonach sich positiv elektrische Moleküle in diesen Körpern um die einzelnen ponderabelen Moleküle mit fortwährend wechselndem Halbmesser herumbewegen, jedes so lange, bis es in Wurfbewegung übergeht und dadurch aus der Wirkungssphäre *eines ponderabelen Moleküls zu der eines anderen* geführt wird.

Und schließlich in Bezug auf nicht leitende Festkörper (isolierende Feststoffe) folgte Weber der Idee Mossottis:[27]

> Ferner führt, was den *festen Aggregatzustand* betrifft, die Betrachtung der *Krystalle* mit *Fortpflanzung des Lichtes* durch dieselben und als *elektrische Isolatoren*, auf den von Mossotti *begründeten festen Aggregatzustand*, wonach Moleküle in gewissen Abständen von einander im *stabilen Gleichgewichte* sich befinden, welches Gleichgewicht zu Stande kommt durch *Abstossungskräfte* dieser Moleküle selbst, ferner durch die *Abstossungskräfte* der Moleküle eines die Zwischenräume enthaltenden (positiv elektrischen) Fluidums und endlich durch die *Anziehungskräfte* jener ponderabelen und dieser (positiv elektrischen) Moleküle.

Weber stellte einige allgemeine Ideen zur Diskussion, die helfen könnten, die Unterschiede zwischen Eis, Wasser und Dampf auf der Basis seines fundamentalen Kraftgesetzes zu erklären. Er machte auch allgemeine Aussagen zum Schmelzpunkt von Eis, zum Siedepunkt von Wasser und zur Kristallbildung von Festkörpern.

[26] [Web94a, Webers *Werke*, Band 4, S. 515] und [Web08, S. 48].
[27] [Web94a, Webers *Werke*, Band 4, S. 516] und [Web08, S. 48].

Kapitel 11

Abschließende Betrachtungen

In diesem abschließenden Kapitel soll auf einige Spekulationen und Entwicklungen der Weberschen atomistischen Naturauffassung und des planetarischen Atommodells hingewiesen werden.

Kathodenstrahlen wurden gegen Ende des 19. Jahrhunderts von vielen Wissenschaftlern untersucht. Während vieler Jahre war nicht klar, ob es sich um ein Wellenphänomen oder ob es sich um bewegliche geladene Teilchen handelte. Heinrich Hertz (1857-1894) hat zum Beispiel Experimente zu diesem Thema gemacht. Er wurde stark von Helmholtz (1821-1894) beeinflusst, einem Opponenten der Weberschen Ideen. Helmholtz und Hertz glaubten, dass die Kathodenstrahlen ein Wellenphänomen seien. Später wurde jedoch schlüssig nachgewiesen, dass Kathodenstrahlen durch die Bewegung geladener Teilchen verursacht werden.

Eduard Riecke (1845-1915), Nachfolger von Wilhelm Weber in Göttingen und Verfechter von Webers atomistischen Konzeptionen, verwendete in seiner Veröffentlichung im Jahr 1881 die Weberschen Atome und die entsprechenden Symbole.[1] Zum Beispiel wurde das Symbol e für die elektrische Ladung und das Symbol ε für die träge Masse des Teilchens verwendet. Riecke gelang es mit diesem Verfahren, die Kreis- und Spiralbahnen eines geladenen Teilchens in einem homogenen Magnetfeld abzuleiten.

Zöllner veröffentlichte im Jahr 1878 eine Arbeit, in der er die elektrischen Phänomene von Licht und Strahlungswärme untersuchte.[2] Insbesondere beschäftigte er sich mit der Entdeckung von Hankel im Jahre 1877, der Entstehung von elektrostatischen Ladungen auf der Oberfläche von Kristallen durch Lichtstrahlung sowie mit der Entdeckung von Sale im Jahr 1873, dass Selenium als Kristall seinen Widerstand entsprechend der Frequenz des auftreffenden Lichts ändert. Folgende Anmerkung Zöllners findet sich in der Schlussfolgerung seiner

[1] [Rie81] und [Wie08].
[2] [Zol78b].

Arbeit:[3]

> Vom Standpunkte der elektrodynamischen Theorie der Materie und im Sinne der Anschauungen W. Weber's heisst dies aber nichts Anderes, als dass elektrische Theilchen, welche zu Molecularströmen mit einander vereinigt sind, durch Bestrahlung von einander getrennt und zu andern Bahnen ihrer Bewegung veranlasst werden können.

Dies ist eine erstaunliche Erkenntnis, die viele Jahre vor der Entdeckung des photoelektrischen Effekts durch Hertz im Jahr 1887 entwickelt wurde.

Weber ging davon aus, dass die ponderablen Atome und Moleküle durch elektrodynamische Kräfte zusammengehalten werden, die zwischen seinen elementaren geladenen Teilchen wirken. Dies eröffnete die Möglichkeit, die Umwandlung eines chemischen Elements in ein anderes durch äußere elektrodynamische Kräfte in Betracht zu ziehen![4]

Insbesondere finden sich in Webers letzter großen Abhandlung die folgenden Anmerkungen:[5]

> In allen Molekülen der *dritten Klasse* dagegen sind die *positiv elektrischen* unter + angeführten von den *negativ elektrischen* unter − angeführten *möglicher* Weise immer scheidbar, wenn auch oft keine zu ihrer Scheidung hinreichend grosse Kraft vorhanden ist. Wirklich ist noch keine solche Scheidung, wodurch ein ponderabeler Körper in seine impoderabelen Bestandtheile zerlegt worden wäre, beobachtet worden. Da aber Zerlegungen ponderabeler Körper in ponderabele Bestandtheile häufig beobachtet werden, durch fortgesetzte Zerlegungen aber man endlich zu ponderabelen Körper gelangt, die nicht weiter haben zerlegt werden können, so hat man diese letzten ponderabelen Körper zwar als *Elementarkörper* bezeichnet, wodurch aber die *Möglichkeit* ihrer Zerlegung in positive und negative elektrische Moleküle nicht ausgeschlossen wird.

Friedrich Kohlrausch (1840-1910) war einer der Physiker, der die Umwandlung chemischer Elemente durch elektrodynamische Kräfte für möglich erachtete. Er war der Sohn von Webers Mitarbeiter Rudolf Kohlrausch und war zunächst ein bezahlter Assistent von Weber am Physikalischen Institut der Universität Göttingen (1866). Im Jahr 1870 legte Weber die Leitung des Göttinger Seminars nieder, so dass F. Kohlrausch, dessen Doktorvater er war, diese Position übernehmen konnte.[6] Im Jahre 1879 äußerte F. Kohlrausch im Zusammenhang mit Webers Planetenmodell des Atoms eine geniale Idee, nämlich:[7]

[3] [Zol78b, S. 610].
[4] [Wie60, S. 216-220].
[5] [Web94a, Webers *Werke*, Band 4, S. 496] und [Web08, S. 23].
[6] [JM86, S. 104-107].
[7] [Koh11, Band 2, S. 172] und [Wie60, S. 218-219].

> Will man hiernach die Möglichkeit zugeben, daß die Elektrizität und dieser Urstoff der Substanz identisch sind oder doch in nahem Zusammenhang stehen, so würden bei dem Versuche, chemisch verschiedene Stoffe ineinander zu verwandeln, elektrische Hilfsmittel vielleicht die größte Aussicht auf einen Erfolg bieten.

Diese Möglichkeit wurde ein halbes Jahrhundert später in den Teilchenbeschleunigern der modernen Physik praktisch umgesetzt.

Literaturverzeichnis

[AC92] A. K. T. Assis and R. A. Clemente. The ultimate speed implied by theories of Weber's type. *International Journal of Theoretical Physics*, 31:1063–1073, 1992.

[AC15] A. K. T. Assis and J. P. M. C. Chaib. *Ampère's Electrodynamics — Analysis of the Meaning and Evolution of Ampère's Force between Current Elements, together with a Complete Translation of His Masterpiece: Theory of Electrodynamic Phenomena, Uniquely Deduced from Experience*. Apeiron, Montreal, 2015. ISBN: 978-1-987980-03-5. Available at www.ifi.unicamp.br/~assis.

[AH07] A. K. T. Assis and J. A. Hernandes. *The Electric Force of a Current: Weber and the Surface Charges of Resistive Conductors Carrying Steady Currents*. Apeiron, Montreal, 2007. ISBN: 9780973291155. Available at www.ifi.unicamp.br/~assis.

[AH13] A. K. T. Assis and J. A. Hernandes. *Elektrischer Strom und Oberflächenladungen: was Wilhelm Weber schon vor mehr als 150 Jahre wußte*. Apeiron, Montreal, 2013. German translation by H. Härtel. ISBN: 9780992045609. Available at www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Amp20a] A.-M. Ampère. Mémoire présenté à l'Académie royale des Sciences, le 2 octobre 1820, où se trouve compris le résumé de ce qui avait été lu à la même Académie les 18 et 25 septembre 1820, sur les effets des courans électriques. *Annales de Chimie et de Physique*, 15:59–76, 1820.

[Amp20b] A.-M. Ampère. Suite du Mémoire sur l'Action mutuelle entre deux courans électriques, entre un courant électrique et un aimant ou le globe terrestre, et entre deux aimants. *Annales de Chimie et de Physique*, 15:170–218, 1820.

[Amp22a] A.-M. Ampère. Expériences relatives à de nouveaux phénomènes électro-dynamiques. *Annales de Chimie et de Physique*, 20:60–74, 1822.

[Amp22b] A.-M. Ampère. Mémoire sur la Détermination de la formule qui représente l'action mutuelle de deux portions infiniment petites de

conducteurs voltaïques. Lu à l'Académie royale des Sciences, dans la séance du 10 juin 1822. *Annales de Chimie et de Physique*, 20:398–421, 1822.

[Amp23] A.-M. Ampère. Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électro-dynamiques uniquement déduite de l'expérience, dans lequel se trouvent réunis les Mémoires que M. Ampère a communiqués à l'Académie royale des Sciences, dans les séances des 4 et 26 décembre 1820, 10 juin 1822, 22 décembre 1823, 12 septembre et 21 novembre 1825. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France*, 6:175–387, 1823. Despite this date, the work was only published in 1827.

[Amp26] A.-M. Ampère. *Théorie des Phénomènes Électro-dynamiques, Uniquement Déduite de l'Expérience*. Méquignon-Marvis, Paris, 1826.

[Amp65a] A.-M. Ampère. The effects of electric currents. In R. A. R. Tricker, *Early Electrodynamics — The First Law of Circulation*, pages 140–154, New York, 1965. Pergamon. Partial English translation by O. M. Blunn of Ampère's works published in *Annales de Chimie et de Physique*, Vol. 15, pp. 59-76 and 170-218 (1820).

[Amp65b] A.-M. Ampère. On the Mathematical Theory of Electrodynamic Phenomena, Experimentally Deduced. In R. A. R. Tricker, *Early Electrodynamics — The First Law of Circulation*, pages 155–200, New York, 1965. Pergamon. Partial English translation by O. M. Blunn of Ampère's work "Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électro-dynamiques uniquement déduite de l'expérience", *Mémoires de l'Académie royale des Sciences de l'Institut de France*, Vol. 6, pp. 175-387 (1823), issued 1827.

[ARW02] A. K. T. Assis, K. Reich, and K. H. Wiederkehr. Gauss and Weber's creation of the absolute system of units in physics. *21st Century Science & Technology*, Vol. 15, No. 3:40–48, 2002.

[ARW04] A. K. T. Assis, K. Reich, and K. H. Wiederkehr. On the electromagnetic and electrostatic units of current and the meaning of the absolute system of units — For the 200th anniversary of Wilhelm Weber's birth. *Sudhoffs Archiv*, 88:10–31, 2004.

[Ass89] A. K. T. Assis. On Mach's principle. *Foundations of Physics Letters*, 2:301–318, 1989.

[Ass93] A. K. T. Assis. Changing the inertial mass of a charged particle. *Journal of the Physical Society of Japan*, 62:1418–1422, 1993.

[Ass94] A. K. T. Assis. *Weber's Electrodynamics*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1994. ISBN: 0792331370.

[Ass97] A. K. T. Assis. Circuit theory in Weber electrodynamics. *European Journal of Physics*, 18:241–246, 1997.

[Ass99] A. K. T. Assis. *Relational Mechanics*. Apeiron, Montreal, 1999. ISBN: 0968368921. Available at www.ifi.unicamp.br/~assis.

[AW03] A. K. T. Assis and K. H. Wiederkehr. Weber quoting Maxwell. *Mitteilungen der Gauss-Gesellschaft*, 40:53–74, 2003.

[AWW11] A. K. T. Assis, K. H. Wiederkehr, and G. Wolfschmidt. *Weber's Planetary Model of the Atom*, volume 19 of *Nuncius Hamburgensis — Beiträge zur Geschichte der Naturwissenschaften*. Tredition Science, Hamburg, 2011. Edited by G. Wolfschmidt. ISBN: 9783842402416.

[AWW14] A. K. T. Assis, K. H. Wiederkehr, and G. Wolfschmidt. *O Modelo Planetário de Weber para o Átomo*. Apeiron, Montreal, 2014. ISBN: 9780992045654. Available at www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Bio28] J. B. Biot. *Lehrbuch der Experimental-physik oder Erfahrungs-naturlehre*, volume 1. Leopold Voss, Leipzig, 2nd edition, 1828. German translation by G. T. Fechner.

[Blo82] C. Blondel. *A.-M. Ampère et la Création de l'Électrodynamique (1820-1827)*. Bibliothèque Nationale, Paris, 1982.

[CA91] R. A. Clemente and A. K. T. Assis. Two-body problem for Weber-like interactions. *International Journal of Theoretical Physics*, 30:537–545, 1991.

[Dar00] O. Darrigol. *Electrodynamics from Ampère to Einstein*. Oxford University Press, Oxford, 2000.

[Dru05] P. Drude. Electric conduction in metals, from the standpoint of the electronic theory. *Transactions of the International Electrical Congress*, 1:317–330, 1905. St. Louis. Reprinted in P. Drude, Zur Elektronentheorie der Metalle (Verlag Harri Deutsch, Frankfurt, 2006), H. T. Grahn and D. Hoffmann (eds.), Vol. 298 of Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften.

[Eby77] P. B. Eby. On the perihelion precession as a Machian effect. *Lettere al Nuovo Cimento*, 18:93–96, 1977.

[Far21a] M. Faraday. Historical sketch of electro-magnetism. *Annals of Philosophy*, 2:195–200, 1821.

[Far21b] M. Faraday. Historical sketch of electro-magnetism. *Annals of Philosophy*, 2:274–290, 1821.

[Far22] M. Faraday. Historical sketch of electro-magnetism. *Annals of Philosophy*, 3:107–121, 1822.

[Far89] M. Faraday. *Experimental-Untersuchungen über Elektricität*, volume I. Springer, Berlin, 1889. Deutsche Uebersetzung von S. Kalischer.

[Far52] M. Faraday. *Experimental Researches in Electricity*, volume 45, pp. 253-898 of *Great Books of the Western World.* Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952.

[Far65a] M. Faraday. *Experimental Researches in Electricity*, volume I and II. Dover, New York, 1965.

[Far65b] M. Faraday. *Experimental Researches in Electricity*, volume III. Dover, New York, 1965.

[Fec] Fechner, G. T., Drei Versuchsreihen, welche die elektromotorische Kraft und die einzelnen Elemente des Leitungswiderstandes betreffen, in J. B. Biot, *Lehrbuch des Galvanismus und der Elektrochemie* (Leipzig, 1829, 2nd edition), Nachträge, pp. 553-564. Reprinted in *Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften*, Nr. 244, C. Piel (ed.), (Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1938), pp. 30-38.

[Fec45] G. T. Fechner. Ueber die Verknüpfung der Faraday'schen Inductions-Erscheinungen mit den Ampèreschen elektro-dynamischen Erscheinungen. *Annalen der Physik*, 64:337–345, 1845.

[Fec64] G. T. Fechner. *Ueber die physikalische und philosophische Atomenlehre.* Hermann Mendelssohn, Leipzig, 2nd edition, 1864.

[Fre85a] A. Fresnel. Comparaison de la supposition des courants autour de l'axe avec celle des courants autour chaque molécule. In J. Joubert, editor, *Collection de Mémoires relatifs a la Physique,* Vol. II: *Mémoires sur l'Électrodynamique*, pages 141–143. Gauthier-Villars, Paris, 1885.

[Fre85b] A. Fresnel. Deuxième note sur l'hipothèse des courants particulaires. In J. Joubert, editor, *Collection de Mémoires relatifs a la Physique,* Vol. II: *Mémoires sur l'Électrodynamique*, pages 144–147. Gauthier-Villars, Paris, 1885.

[Ger98] P. Gerber. Die räumliche und zeitliche Ausbreitung der Gravitation. *Zeitschrift fur Mathematik und Physik II*, 43:93–104, 1898.

[Ger17] P. Gerber. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Gravitation. *Annalen der Physik*, 52:415–444, 1917.

[GG90] I. Grattan-Guinness. *Convolutions in French Mathematics, 1800-1840*, volume 2. Birkhäuser, Basel, 1990.

[GG91] I. Grattan-Guinness. Lines of mathematical thought in the electrodynamics of Ampère. *Physis*, 28:115–129, 1991.

[Hec96] L. Hecht. The significance of the 1845 Gauss-Weber correspondence. *21st Century Science & Technology*, 9(3):22–34, 1996.

[Hei93] M. Heidelberger. *Die innere Seite der Natur: Gustav Theodor Fechner wissenschaftlich-philosophische Weltauffassung.* Vittorio Klostermann, Frankfurt, 1993.

[Hei04] M. Heidelberger. *Nature from Within: Gustav Theodor Fechner and His Psychophysical Worldview.* University of Pittsburgh Press, Pittsburgh, 2004. Translated by C. Klohr.

[Hof82] J. R. Hofmann. *The Great Turning Point in André-Marie Ampère's Research in Electrodynamics: A Truly "Crucial" Experiment.* PhD thesis, Graduate Faculty of Arts and Sciences, University of Pittsburgh, Pittsburgh, 1982.

[Hof87] J. R. Hofmann. Ampère, electrodynamics, and experimental evidence. *Osiris*, 3 (2nd Series):45–76, 1987.

[Hof96] J. R. Hofmann. *André-Marie Ampère, Enlightenment and Electrodynamics.* Cambridge University Press, Cambridge, 1996.

[JM86] C. Jungnickel and R. McCormmach. *Intellectual Mastery of Nature — Theoretical Physics from Ohm to Einstein*, volume 1-2. University of Chicago Press, Chicago, 1986.

[Koh11] F. Kohlrausch. *Gesammelte Abhandlungen von Friedrich Kohlrausch.* J. A. Barth, Leipzig, 1910-11. W. Hallwachs, A. Heydweiller, K. Strecker and O. Wiener (eds.), 2 volumes.

[KW57] R. Kohlrausch and W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere Zurückführung der Stromintensitäts-Messungen auf mechanisches Maass. *Abhandlungen der Königl. Sächs. Gesellschaft der Wissenschaften, mathematisch-physische Klasse*, 3:221–290, 1857. Reprinted in Wilhelm Weber's *Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), pp. 609-676.

[Max83a] J. C. Maxwell. *Lehrbuch der Electricität und des Magnetismus.* Springer, Berlin, 1883. 1 Bde. Deutsche Übersetzung von B. Weinstein.

[Max83b] J. C. Maxwell. *Lehrbuch der Electricität und des Magnetismus.* Springer, Berlin, 1883. 2 Bde. Deutsche Übersetzung von B. Weinstein.

[Max54a] J. C. Maxwell. *A Treatise on Electricity and Magnetism*, volume I. Dover, New York, 1954.

[Max54b] J. C. Maxwell. *A Treatise on Electricity and Magnetism*, volume II. Dover, New York, 1954.

[Mos36] O. F. Mossotti. *Sur les forces qui régissent la constitution intérieure des corps, apperçu pour servir à la détermination de la cause et des lois de l'action moléculaire.* L'Imprimerie Royale, Turin, 1836. Reprinted in F. Zöllner, *Erklärung der Universellen Gravitation aus den statischen Wirkungen der Elektricität und die allgemeine Bedeutung des Weber'schen Gesetzes* (L. Staackmann, Leipzig, 1882), pp. 83-112.

[Nor65] J. D. North. *The Measure of the Universe — A History of Modern Cosmology.* Clarendon Press, Oxford, 1965.

[Oer20a] H. C. Oersted. Experiments on the effect of a current of electricity on the magnetic needle. *Annals of Philosophy*, 16:273–277, 1820. Translated from a printed account drawn up in Latin by the author and transmitted by him to the Editor of the *Annals of Philosophy.*

[Oer20b] J. C. Oersted. Versuche über die Wirkung des electrischen Conflicts auf die Magnetnadel. *Annalen der Physik*, 6:295–304, 1820. Translated by Gilbert.

[Oer95] H. C. Oersted. *Versuche über die Wirkung des elektrischen Conflicts auf die Magnetnadel*, volume 63 of *Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften.* Wilhelm Engelmann Verlag, Leipzig, 1895.

[Ohm26] G. S. Ohm. Bestimmung des Gesetzes, nach welchem Metalle die Kontakt-Elektrizität leiten, nebst einem Entwurfe zu einer Theorie des Voltaschen Apparates und des Schweiggerschen Multiplikators. *Journal für Chemie und Physik*, 46:137–166, 1826. Reprinted in *Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften*, Nr. 244, C. Piel (ed.), (Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1938), pp. 8-29.

[O'R65] A. O'Rahilly. *Electromagnetic Theory — A Critical Examination of Fundamentals.* Dover, New York, 1965.

[Ørs98] H. C. Ørsted. New electro-magnetic experiments. In K. Jelved, A. D. Jackson, and O. Knudsen, editors, *Selected Scientific Works of Hans Christian Ørsted*, pages 421–424. Princeton University Press, Princeton, 1998. Paper originally published in German in 1820.

[Ram] C. Ramsauer, Das Ohmsche Gesetz (1826), in C. Ramsauer, *Grundversuche der Physik in historischer Darstellung* (Springer, Berlin, 1953), Vol. 1: Von der Fallgesetzen bis zu den elektrischen Wellen.

[Rie81] E. Riecke. Über die Bewegung eines elektrischen Teilchens in einem homogenen magnetischen Felde und das negative elektrische glimmlicht. *Annalen der Physik*, 13:191–194, 1881.

[Rie92] E. Riecke. *Wilhelm Weber (geb. 24. October 1804, gest. 23. Juni 1891).* Dieterichsche Verlags-Buchhandlung, Göttingen, 1892. Rede

gehalten in der öffentlichen Sitzung der K. Gesellschaft der Wissenschaften am 5. December 1891.

[Sch25] E. Schrödinger. Die Erfüllbarkeit der Relativitätsforderung in der klassischen Mechanik. *Annalen der Physik*, 77:325–336, 1925.

[See] C. Seegers. De motu perturbationibusque planetarum secundum legem electrodynamicam Weberianam solem ambientium. Dissertation, Göttingen, 1864.

[See24] C. Seegers. *Über die Bewegung und die Störungen der Planeten, wenn dieselben sich nach dem Weberschen elektrodynamischen Gesetz um die Sonne bewegen.* Kommissionsverlag von Friedr. Viewweg & Sohn Akt. Ges., Braunschweig, 1924. Neu herausgegeben von P. Heylandt. Übersetzt von F. Diestel.

[Ser] A. Servus, Untersuchungen über die Bahn und die Störungen der Himmelskörper mit Zugrundelegung des Weber'schen electrodynamischen Gesetzes. Dissertation, Halle, 1885.

[Ste03] F. Steinle. The practice of studying practice: Analyzing research records of Ampère and Faraday. In F. L. Holmes, J. Renn, and H.-J. Rheinberger, editors, *Reworking the Bench: Laboratory Notebooks in the History of Science*, pages 93–117. Kluwer, Dordrecht, 2003.

[Ste05] F. Steinle. *Explorative Experimente. Ampère, Faraday und die Ursprünge der Elektrodynamik.* Franz Steiner Verlag, Stuttgart, 2005.

[Sym71] K. R. Symon. *Mechanics.* Addison-Wesley, Reading, third edition, 1971.

[Tis72] F. Tisserand. Sur le mouvement des planètes autour du soleil, d'après la loi électrodynamique de Weber. *Comptes Rendues de l'Academie des Sciences de Paris*, 75:760–763, 1872.

[Tis95] F. F. Tisserand. *Traité de Mécanique*, volume 4, Chapter 28 (Vitesse de propagation de l'attraction), pp. 499-503, "Loi d'attraction conforme à la loi électrodynamique de Weber". Gauthier-Villars, Paris, 1895.

[TKG23] R. C. Tolman, S. Karrer, and W. W. Guernsey. Further experiments on the mass of the electric carrier in metals. *Physical Review*, 21:525–539, 1923.

[TMS26] R. C. Tolman and L. M. Mott-Smith. A further study of the inertia of the electric carrier in copper. *Physical Review*, 28:794–832, 1926.

[TOS14] R. C. Tolman, E. W. Osgerby, and T. D. Stewart. The acceleration of electrical conductors. *Journal of the American Chemical Society*, 36:466–485, 1914.

[TS16] R. C. Tolman and T. D. Stewart. The electromotive force produced by the acceleration of metals. *Physical Review*, 8:97–116, 1916.

[Vol00a] A. Volta. On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. *Philosophical Transactions*, 90:403–431, 1800. Letter in French from A. Volta to J. Banks dated March 20, 1800. It was read before the Royal Society in June 26, 1800.

[Vol00b] A. Volta. On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. *Philosophical Magazine*, 7:289–311, 1800.

[Web39] W. Weber. Unipolare Induktion. *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins*, III:63–90, 1839. Reprinted in Wilhelm Weber's *Werke*, Vol. 2, E. Riecke (ed.), (Springer, Berlin, 1892), pp. 153-175.

[Web41] W. Weber. Unipolare Induktion. *Annalen der Physik und Chemie*, 52:353–386, 1841. Reprinted in Wilhelm Weber's *Werke*, Vol. 2, E. Riecke (ed.), (Springer, Berlin, 1892), pp. 176-179.

[Web46] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen — Über ein allgemeines Grundgesetz der elektrischen Wirkung. *Abhandlungen bei Begründung der Königl. Sächs. Gesellschaft der Wissenschaften am Tage der zweihundertjährigen Geburtstagfeier Leibnizen's herausgegeben von der Fürstl. Jablonowskischen Gesellschaft (Leipzig)*, pages 211–378, 1846. Reprinted in Wilhelm Weber's *Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), pp. 25-214.

[Web48a] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen. *Annalen der Physik und Chemie*, 73:193–240, 1848. Reprinted in Wilhelm Weber's *Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), pp. 215-254.

[Web48b] W. Weber. Über die Erregung und Wirkung des Diamagnetismus nach den Gesetzen inducirter Ströme. *Annalen der Physik und Chemie*, 73:241–256, 1848. Reprinted in Wilhelm Weber's *Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), pp. 255-268.

[Web52a] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere über Diamagnetismus. *Abhandlungen der Königl. Sächs. Gesellschaft der Wissenschaften, mathematisch-physische Klasse*, 1:485–577, 1852. Reprinted in Wilhelm Weber's *Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), pp. 473-554.

[Web52b] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere Widerstandsmessungen. *Abhandlungen der Königl. Sächs. Gesellschaft der Wissenschaften, mathematisch-physische Klasse*, 1:199–381, 1852. Reprinted in Wilhelm Weber's *Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), pp. 301-471.

[Web52c] W. Weber. Üeber den Zusammenhang der Lehre vom Diamagnetismus mit der Lehre von dem Magnetismus und der Elektricität. *Annalen der Physik und Chemie*, 87:145–189, 1852. Reprinted in Wilhelm Weber's *Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), pp. 555-590.

[Web55] W. Weber. Vorwort bei der Übergabe der Abhandlung: *Elektrodynamische Maassbestimmungen, insbesondere Zurückführung der Stromintensitäts-Messungen auf mechanisches Maass. Berichte über die Verhandlungen der Königl. Sächs. Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig, mathematisch-physische Klasse*, 17:55–61, 1855. Reprinted in Wilhelm Weber's *Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), pp. 591-596.

[Web62] W. Weber. Zur Galvanometrie. *Abhandlungen der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, mathematische Klasse*, 10:3–96, 1862. Reprinted in Wilhelm Weber's *Werke*, Vol. 4, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1894), pp. 17-96.

[Web64] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere über elektrische Schwingungen. *Abhandlungen der Königl. Sächs. Geselschaft der Wissenschaften, mathematisch-physische Klasse*, 6:571–716, 1864. Reprinted in Wilhelm Weber's *Werke*, Vol. 4, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1894), pp. 105-241.

[Web71] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere über das Princip der Erhaltung der Energie. *Abhandlungen der Königl. Sächs. Gesellschaft der Wissenschaften, mathematisch-physische Klasse (Leipzig)*, 10:1–61, 1871. Reprinted in Wilhelm Weber's *Werke*, Vol. 4, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1894), pp. 247-299.

[Web72] W. Weber. Electrodynamic measurements — Sixth memoir, relating specially to the principle of the conservation of energy. *Philosophical Magazine*, 43:1–20 and 119–149, 1872.

[Web75] W. Weber. Ueber die Bewegung der Elektricität in Körpern von molekularer Konstitution. *Annalen der Physik und Chemie*, 156:1–61, 1875. Reprinted in Wilhelm Weber's *Werke*, Vol. 4, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1894), pp. 312-357.

[Web78] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere über die Energie der Wechselwirkung. *Abhandlungen der Königl. Sächs. Gesellschaft der Wissenschaften, mathematisch-physische Klasse, (Leipzig)*, 11:641–696, 1878. Reprinted in Wilhelm Weber's *Werke*, Vol. 4, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1894), pp. 361-412.

[Web92a] W. Weber. *Wilhelm Weber's Werke,* E. Riecke (ed.), volume 2, *Magnetismus.* Springer, Berlin, 1892.

[Web92b] W. Weber. *Wilhelm Weber's Werke,* W. Voigt, (ed.), volume 1, *Akustik, Mechanik, Optik und Wärmelehre.* Springer, Berlin, 1892.

[Web93] W. Weber. *Wilhelm Weber's Werke,* H. Weber (ed.), volume 3, *Galvanismus und Elektrodynamik*, first part. Springer, Berlin, 1893.

[Web94a] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere über den Zusammenhang des elektrischen Grundgesetzes mit dem Gravitationsgesetze. In H. Weber, editor, Wilhelm Weber's *Werke,* Vol. 4, pages 479–525, Berlin, 1894. Springer.

[Web94b] W. Weber. *Wilhelm Weber's Werke,* H. Weber, (ed.), volume 4, *Galvanismus und Elektrodynamik*, second part. Springer, Berlin, 1894.

[Web07] W. Weber, 2007. Determinations of electrodynamic measure: concerning a universal law of electrical action, 21st Century Science & Technology, posted March 2007, translated by S. P. Johnson, edited by L. Hecht and A. K. T. Assis. Available at: www.21stcenturysciencetech.com/translation.html.

[Web08] W. Weber, 2008. Determinations of electrodynamic measure: particularly in respect to the connection of the fundamental laws of electricity with the law of gravitation, 21st Century Science & Technology, posted November 2008, translated by G. Gregory, edited by L. Hecht and A. K. T. Assis. Available at: www.21stcenturysciencetech.com/translation.html.

[Whi73] E. T. Whittaker. *A History of the Theories of Aether and Electricity*, volume 1: *The Classical Theories.* Humanities Press, New York, 1973.

[Wie60] K. H. Wiederkehr. Wilhelm Webers Stellung in der Entwicklung der Elektrizitätslehre. Dissertation, Hamburg, 1960.

[Wie67] K. H. Wiederkehr. *Wilhelm Eduard Weber — Erforscher der Wellenbewegung und der Elektrizität (1804-1891)*, volume 32 of *Grosse Naturforscher,* H. Degen (ed.). Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart, 1967.

[Wie88] K. H. Wiederkehr. Zur Deutung magnetischer Phänomene im 19. Jahrhundert. *Physikalische Blätter*, 44:129–134, 1988.

[Wie91] K. H. Wiederkehr. Faradays Feldkonzept und Hans Christian Oersted. *Physikalische Blätter*, 47:825–830, 1991.

[Wie93] K. H. Wiederkehr. Das Experiment von Wilhelm Weber und Rudolf Kohlrausch 1855 und Maxwells elektromagnetische Lichttheorie. In W. Schröder, editor, *The Earth and the Universe (A Festschrift in honour of Hans-Jürgen Treder)*, pages 452–463. Interdivisional Commission on History of the International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Bremen-Rönnebeck, 1993.

[Wie94] K. H. Wiederkehr. Wilhelm Weber und Maxwells elektromagnetische Lichttheorie. *Gesnerus, Part. 3/4*, 51:256–267, 1994.

[Wie99] K. H. Wiederkehr. Die Entdeckung des Elektrons. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, 52:132–139, 1999.

[Wie04] K. H. Wiederkehr. Ein bisher unveröffentlichter Brief von Rudolf Kohlrausch an Andreas v. Ettingshausen von 1854, das Kohlrausch-Weber-Experiment von 1854/55 und die Lichtgeschwindigkeit in Wilhelm Webers Elektrodynamik. *NTM International Journal of History and Ethics of Natural Sciences, Technology and Medicine*, 12:129–145, 2004.

[Wie07] K. H. Wiederkehr. Über Vorstellungen vom Wesen des elektrischen Stromes bis zum Beginn der Elektronentheorie der Metalle. In G. Wolfschmidt, editor, *"Es gibt für Könige keinen besonderen Weg zur Geometrie" — Festschrift für Karin Reich*, pages 299–308. Dr. Erwin Rauner Verlag, Augsburg, 2007.

[Wie08] K. H. Wiederkehr. Heinrich Hertz between the old electrodynamics and Maxwell's theory. In G. Wolfschmidt, editor, *Heinrich Hertz (1857-1894) and the Development of Communication*, pages 151–159. Schwerpunkt Geschichte der Naturwissenschaften, Mathematik und Technik, Hamburg, 2008. Nuncius Hamburgensis: Beiträge zur Geschichte der Naturwissenschaften, Vol. 10.

[WK56] W. Weber and R. Kohlrausch. Über die Elektricitätsmenge, welche bei galvanischen Strömen durch den Querschnitt der Kette fliesst. *Annalen der Physik und Chemie,* J. C. Poggendoff (ed.), 99:10–25, 1856. Reprinted in Wilhelm Weber's *Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), pp. 597-608.

[WK68] W. Weber and R. Kohlrausch. Über die Einführung absoluter elektrischer Maße. In S. Balke, H. Gericke, W. Hartner, G. Kerstein, F. Klemm, A. Portmann, H. Schimank, and K. Vogel, editors, *Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften,* new series, Vol. 5. Friedrich-Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1968. Commented by F. Kohlrausch and K. H. Wiederkehr.

[WW93] E. H. Weber and W. Weber. *Wilhelm Weber's Werke,* E. Riecke (ed.), volume 5, *Wellenlehre auf Experimente gegründet oder über die Wellen tropfbarer Flüssigkeiten mit Anwendung auf die Schall- und Lichtwellen.* Springer, Berlin, 1893. Originally published in 1825.

[WW94] W. Weber and E. Weber. *Wilhelm Weber's Werke,* F. Merkel and O. Fischer (editors), volume 6, *Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge. Eine anatomisch-physiologische Untersuchung.* Springer, Berlin, 1894. Originally published in 1836.

[Zol76] J. C. F. Zollner. *Principien einer elektrodynamischen Theorie der Materie*. Engelmann, Leipzig, 1876.

[Zol78a] J. C. F. Zollner. Ueber die Ableitung der Newton'schen Gravitation aus den statischen Wirkungen der Elektricität. In J. C. F. Zöllner, editor, *Wissenschaftliche Abhandlungen*, pages 417–459 (Vol. 1), Leipzig, 1878. L. Staackmann.

[Zol78b] J. C. F. Zollner. Ueber die elektrischen Wirkungen des Lichtes und der strahlenden Wärme. In J. C. F. Zöllner, editor, *Wissenschaftliche Abhandlungen*, pages 600–610 (Vol. 1), Leipzig, 1878. L. Staackmann.

[Zol82] F. Zollner. *Erklärung der Universellen Gravitation aus den statischen Wirkungen der Elektricität und die allgemeine Bedeutung des Weber'schen Gesetzes*. L. Staackmann, Leipzig, 1882.

[Zol83] J. C. F. Zollner. *Über die Natur der Cometen — Beiträge zur Geschichte und Theorie der Erkenntniss*. L. Staackmann, Leipzig, 3rd edition, 1883. First edition of 1872.

Der vorliegende Text ist eine Übersetzung von Kapitel 1, Seiten 17-101, des Buches *Weber's Planetary Model of the Atom* (Tredition Science, Hamburg, 2011).

In diesem Buch wird das von Wilhelm Weber (1804-1891) in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts entwickelte Atommodell vorgestellt. Diese Entwicklung geschah vor der Bekanntmachung des Bohrschen Modells. Dieses Modell basiert auf der Weberschen elektrodynamischen Kraft von 1846. Diese Webersche Kraft ist abhängig von der Entfernung der wechselwirkenden Ladungsträger, derer relativen radialen Geschwindigkeit und derer relativen radialen Beschleunigung. Weber zeigte, daß sich zwei interagierende Ladungsträger der gleichen Polarität genau so verhalten können, als hätten sie negative träge Masssen und zwar unter folgender Bedingung: Die wechselwirkenden Teilchen sind relativ zu einander beschleunigt und bewegen sich in einem gegenseitigen Abstand unterhalb eines kritischen Wertes ρ. Falls diese Bedingung erfüllt ist, werden sich diese Ladungsträger gleichen Vorzeichens gegenseitig anziehen anstelle der normalerweise beobachteten Abstoßung. Weber stellte dann die Hypothese auf, daß Atome aus negativen Ladungsträgern zusammengesetzt sein könnten, die elliptische Bahnen um einen positiv geladenen Kern ausführen; sie werden von diesem Kern angezogen, und die positiven Teilchen, die den positiven Kern bilden, ziehen sich ebenfalls an wegen ihrer negativen trägen Masse.

Drei bemerkenswerte Aspekte dieses Weberschen Modells sollen hervorgehoben werden:

- Webers Vorhersage erfolgte vor der Entdeckung des Elektrons (1897) und auch vor Rutherfords Streuexperimenten (1911). Die Entwicklung dieses Modells erfolgte ebenfalls vor der Entdeckung der Balmer-Serien (1885) sowie der Paschen-Serien (1908), die die spektralen Emissionslinien des Wasserstoffatoms darstellen. Das Bohrsche Atommodell wurde dagegen entwickelt (1913), um mit diesen experimentellen Ergebnissen kompatibel zu sein. Während somit Bohrs Atommodel auf dieses Ziel hin entwickelt wurde, handelt es sich bei dem Weberschen Modell um eine echte Vorhersage.
- Das Webersche Atommodell kommt ohne Kernkräfte zur Stabilisierung des positiven Kerns aus. Die positiven Teilchen des Kerns werden durch rein elektrodynamische Kräfte zusammengehalten. Bei der Entwicklung der modernen Physik mussten dagegen die Wissenschaftler die Existenz von Nuklearkräften postulieren, da die Kenntnisse bezüglich der Weberschen Elektrodynamik in Vergessenheit geraten waren. Nach dem die Existenz des positiven Kerns gesichert war, musste schließlich erklärt werden, wie die abstoßenden Coulomb-Kräfte zwischen seinen Bestandteilen neutralisiert werden. Hierzu wurde die Existenz von Kernkräften postuliert. Das planetare Atommodell von Weber hingegen bietet eine Vereinheitlichung des Elektromagnetismus mit nuklearen Kräften, und dies bevor diese beiden Zweige der Physik voneinander getrennt wurden. Sogar die Stabilität der Kerne wurde vorhergesagt und erklärt durch Webers Elektrodynamik
- Als Weber sein Modell in den Jahren zwischen 1850 und 1870 entwickelte, waren Elektron und Positron noch nicht bekannt. Diese beiden Teilchen wurden erst 1897 und 1932 entdeckt. Daher konnte er nur qualitative und algebraische Berechnungen in Bezug auf seine kritische Entfernung ρ durchführen. Nimmt man aber die bekannten Werte bezüglich der Masse und der Ladung zweier Positronen und berechnet die Webersche kritische Entfernung, unterhalb derer sich diese Teichen beginnen, anzuziehen, so erhält man einen Wert in der Größenordnung von 10^{-15} m, der im Wesentlichen der bekannten Größe eines Atomkern entspricht. Die Übereinstimmung zwischen Webers ρ für diese Elementarteilchen und der Größe eines Atomkern muß kein Zufall sein. Vielmehr kann man davon ausgehen, daß die Webersche Elektrodynamik nicht nur eine korrekte Erklärung für die Stabilität des Atomkerns, sondern auch eine Begründung für dessen Größe liefert.

978-1-987980-13-4
9 781987 980134